



TUGAS AKHIR - RG 141536

PEMODELAN 3D DENGAN MENGGUNAKAN METODE STRUCTURE FROM MOTION DAN TERRESTRIAL LASER SCANNING

(Studi Kasus: Candi Singosari, Malang)

**ANDI RACHMAN PUTRA
NRP 3511 100 012**

**Dosen Pembimbing
HEPI HAPSARI HANDAYANI ST, M.Sc**

**PROGRAM STUDI TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**



FINAL ASSIGNMENT - RG 141536

3D MODELING USING STRUCTURE FROM MOTION AND TERRESTRIAL LASER SCANNING (Case Study: Singosari Temple, Malang)

ANDI RACHMAN PUTRA
NRP 3511 100 012

Supervisor
HEPI HAPSARI HANDAYANI ST, M.Sc

GEOMATICS ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Civil Engineering and Planning
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**PEMODELAN 3D DENGAN MENGGUNAKAN METODE
STRUCTURE FROM MOTION DAN TERRESTRIAL
LASER SCANNING**

(Studi Kasus: Candi Singosari, Malang)

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Jurusan S-1 Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

**ANDI RACHMAN PUTRA
NRP. 3511 100 012**

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:



**Hepi Hapsari Handayani, ST, M.Sc
NIP. 1978 1212 2005 01 2001**

SURABAYA, JANUARI 2016

PEMODELAN 3D DENGAN MENGGUNAKAN METODE STRUCTURE FROM MOTION DAN TERRESTRIAL LASER SCANNING

(Studi Kasus: Candi Singosari, Malang)

Nama Mahasiswa : Andi Rachman Putra
NRP : 3511 100 012
Jurusan : Teknik Geomatika FTSP - ITS
Dosen Pembimbing : Hepi Hapsari Handayani, ST, M.Sc

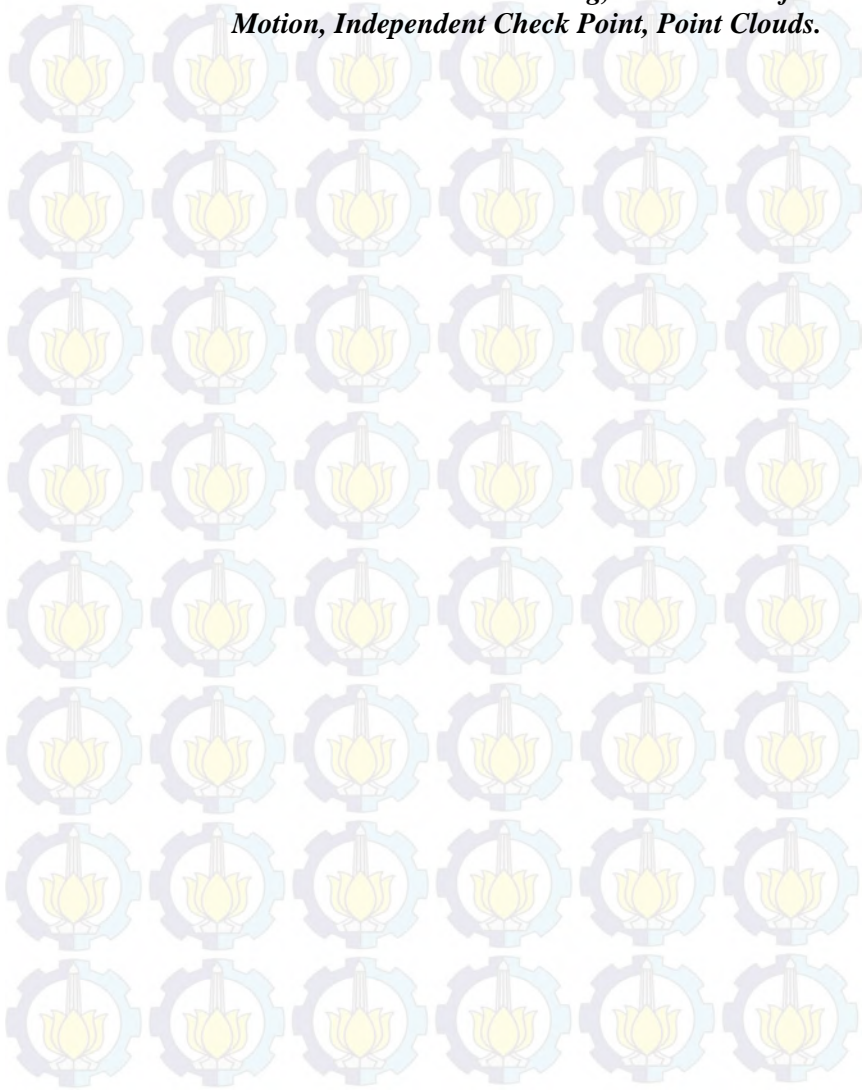
Abstrak

Candi Singosari merupakan salah satu peninggalan sejarah milik Indonesia. Pada awalnya candi ini digunakan sebagai tempat peribadatan dan pemujaan, tetapi sekarang Candi Singosari telah dilestarikan dan dijadikan sebagai tempat wisata. Bangunan dengan nilai budaya dan sejarah seperti candi ini membutuhkan perlindungan serta pemeliharaan, di mana salah satu caranya adalah dengan melakukan dokumentasi dalam bentuk 3D.

Pemodelan 3D dalam penelitian ini dilakukan menggunakan dua metode, yaitu Terrestrial Laser Scanning (TLS) dan Structure from Motion (SfM). Model yang didapat dari kedua metode ini merupakan point clouds. Nilai koordinat Independent Check Point (ICP) dari kedua model ini kemudian dibandingkan dengan nilai koordinat ICP yang didapatkan menggunakan Total Station.

Berdasarkan uji t-student yang telah dilakukan, pada sumbu X dan Y terdapat 2 koordinat yang ditolak untuk kedua metode. Untuk sumbu Z hanya 1 koordinat TLS yang ditolak, sedangkan terdapat 2 koordinat SfM ditolak. Secara keseluruhan, terdapat 31 titik TLS yang diterima atau sebesar 86%, sedangkan untuk SfM sebanyak 30 titik atau 83%. Hal ini menandakan kedua metode memiliki hasil yang baik, di mana kedua metode memberikan hasil di atas 80%. Berdasarkan hasil analisa terlihat bahwa tidak ada perbedaan yang cukup berarti/signifikan antara kedua metode ini.

Kata Kunci: Terrestrial Laser Scanning, Structure from Motion, Independent Check Point, Point Clouds.



3D MODELING USING STRUCTURE FROM MOTION AND TERRESTRIAL LASER SCANNING (Case Study: Singosari Temple, Malang)

Name : Andi Rachman Putra
NRP : 3511 100 012
Department : Geomatics Engineering FTSP - ITS
Supervisor : Hepi Hapsari Handayani, ST, M.Sc

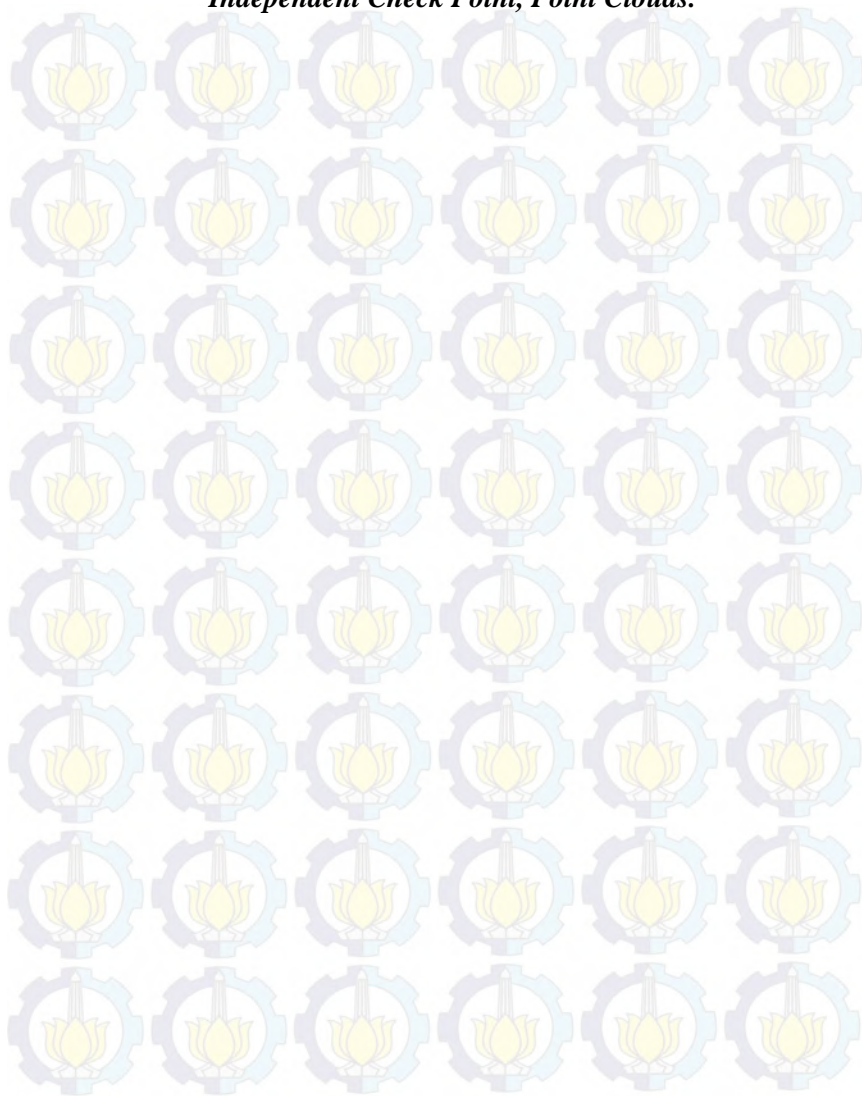
Abstract

Singosari Temple is one of historical relics belonging to Indonesia. This temple was originally used as a place of worship and veneration, but now Singosari Temple has been preserved and used as tourist attractions. Building with cultural and historical value such as this temple is in need of protection as well as maintenance, in which one way is to carry out a documentation in 3D.

3D modeling in this study was conducted using two methods, Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Structure from Motion (SfM). A model obtained from these two methods is point clouds. Independent Check Points (ICPs) of both models are then compared with the coordinates of the ICPs obtained using Total Station.

Based on the t-student test that has been done, 2 coordinates are rejected on the X and Y axis for both methods. For the Z axis, only one TLS coordinate that is rejected, while two SfM coordinate are rejected. Overall, there are 31 TLS points that accepted or equal to 86%, while SfM is as many as 30 points or 83%. This indicates both methods having good results, in which the two methods give results above 80%. Based on the analysis it appears that there are no significant differences between these two methods.

***Keywords: Terrestrial Laser Scanning, Structure from Motion,
Independent Check Point, Point Clouds.***



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur ke hadirat Allah SWT, karena atas segala karunia dan kasih-NYA kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dalam Tugas Akhirnya yang berjudul “PEMODELAN 3D DENGAN MENGGUNAKAN METODE STRUCTURE FROM MOTION DAN TERRESTRIAL LASER SCANNING (Studi Kasus: Candi Singosari, Malang)” sesuai dengan waktu yang ditentukan.

Pada kesempatan ini penulis hendak menyampaikan ucapan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. Ucapan terima kasih ini penulis tunjukkan kepada:

1. Kedua Orang tua, Bapak Budi Santoso dan Ibu Andarini, beserta Adik penulis Saudara Adrian Dharmawan, yang selama ini selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa.
2. Bapak Mokhamad Nur Cahyadi, ST, M.Sc, Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Geomatika FTSP - ITS.
3. Ibu Hepi Hapsari Handayani, ST, M.Sc selaku dosen pembimbing yang selalu sabar dalam membimbing penulis.
4. Bapak - Ibu Dosen dan Karyawan Teknik Geomatika FTSP-ITS.
5. PT. Sistem Solusi Geospasial yang telah membantu dalam peminjaman alat.
6. Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto yang telah memberi ijin untuk melakukan penelitian di area Candi Singosari.
7. Teman – teman G13 yang telah banyak membantu penulis, khususnya dalam penulisan Tugas Akhir ini.
8. Keluarga besar HIMAGE – ITS.
9. Nico Wiliyanto dan Taufan Hananto yang membantu penulis dalam pengambilan data lapangan.
10. Sahabat penulis dari kecil, Dania, Dika, Diki dan Ririn yang selalu menghibur penulis.

11. Dan banyak lagi pihak – pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar – besarnya.

Penulis menyadari segala keterbatasan yang dimiliki, tentunya Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun untuk pengembangan selanjutnya. Harapan penulis atas Tugas Akhir ini adalah semoga dapat memberikan manfaat bagi semua pihak dan dapat diterima sebagai sumbangan pemikiran dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
ABSTRAK.....	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Fotogrametri Jarak Dekat	5
2.1.1 Prinsip Dasar Fotogrametri Jarak Dekat.....	5
2.1.2 Interseksi Spasial (<i>Intersection</i>)	7
2.2 Kalibrasi Kamera.....	8
2.3 <i>Structure from Motion</i>	11
2.3.1 <i>Feature Extraction</i>	12
2.3.2 <i>Feature Matching</i>	13
2.4 <i>Terrestrial Laser Scanning</i>	14
2.5.1 Prinsip Pengukuran TLS	15
2.5.2 Klasifikasi <i>Terrestrial Laser Scanner</i>	18
2.5.3 Teknik Registrasi Data	20
2.5.4 <i>Georeferencing</i>	22
2.5.5 Rekonstruksi Permukaan dan Pemodelan	25
2.5.6 <i>Noise Filtering</i>	27
2.5.7 <i>Resampling</i>	30
2.5.8 <i>Self-Calibration of Terrestrial Laser Scanner</i>	31
2.5.9 Spesifikasi Alat Zoom 300	31
2.5 Uji Statistik <i>t-student</i>	32

2.6	Desain Kekuatan Jaring	34
2.7	Candi Singosari	37
2.7.1	Nama	37
2.7.2	Riwayat Penemuan	37
2.7.3	Riwayat Perawatan	38
2.7.4	Uraian Bangunan	39
2.7.5	Fungsi Candi Singosari	40

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Lokasi Penelitian	43
3.2	Data dan Peralatan	44
3.2.1	Data	44
3.2.2	Peralatan	44
3.3	Metodologi Penelitian	45
3.3.1	Tahap Persiapan	46
3.3.2	Tahap Pengolahan Data	46
3.3.3	Tahap Analisa	49
3.3.4	Tahap Penyajian Data	49

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1	Hasil	51
4.1.1	Perhitungan Poligon	51
4.1.2	Perhitungan GCP dan ICP	51
4.1.3	Perencanaan TLS	54
4.1.4	<i>Filtering</i>	54
4.1.5	Data TLS	55
4.1.6	Kalibrasi Kamera	57
4.1.7	<i>Feature Detection</i>	58
4.1.8	<i>Feature Matching</i>	58
4.1.9	Data <i>SfM</i>	59
4.1.10	<i>Georeference</i>	62
4.1.11	Koordinat ICP data <i>SfM</i> dan <i>TLS</i>	62
4.2	Analisa	64
4.2.1	Analisa Kerangka Kontrol	64
4.2.2	Analisa Proses TLS	64
4.2.3	Analisa Proses <i>SfM</i>	67
4.2.4	Analisa Proses <i>Georeference</i>	71

4.2.5	Analisa Koordinat ICP	72
BAB V PENUTUP		
5.1	Kesimpulan.....	75
5.2	Saran.....	75
DAFTAR PUSTAKA		77
LAMPIRAN.....		81
PROFIL PENULIS		87

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kondisi Kesegaran (Colinearity Condition)	6
Gambar 2.2 Interseksi Spasial	8
Gambar 2.3 Contoh fitur SIFT yang terdeteksi	13
Gambar 2.4 Mekanisme pengukuran TLS.....	16
Gambar 2.5 Prinsip pengukuran TLS	17
Gambar 2.6 Perbedaan 3 jenis TLS	20
Gambar 2.7 Hubungan sistem koordinat pada TLS	23
Gambar 2.8 Pendekatan Noise Filtering.....	29
Gambar 2.9 Geomax Zoom 300	32
Gambar 2.10 Ukiran yang Menandakan Tahun Penyelesaian Rekonstruksi.....	39
Gambar 2.11 Candi Singosari Hasil Rekonstruksi H.L. Leydie Melville	40
Gambar 2.12 Denah Bangunan Candi Singosari oleh H.L. Leydie Melville	40
 Gambar 3.1 Lokasi Penelitian: Candi Singosari.....	 43
Gambar 3.2 Diagram Alir Tahapan Penelitian	45
Gambar 3.3 Diagram Alir Tahap Pengolahan Data.....	47
 Gambar 4.1 Letak GCP dan ICP pada tampak depan Candi	 53
Gambar 4.2 Letak GCP dan ICP pada tampak belakang Candi ..	53
Gambar 4.3 Perencanaan Posisi <i>Laser Scanner</i>	54
Gambar 4.4 CS_01 Sebelum Proses Filtering	55
Gambar 4.5 Data CS_01 Setelah Proses Filtering	55
Gambar 4.6 Tampak Depan Data TLS	56
Gambar 4.7 Tampak Samping Data TLS	56
Gambar 4.8 Tampak Atas Data TLS	57
Gambar 4.9 Foto 1 (kiri) dan Foto 2 (Kanan)	58
Gambar 4.10 <i>Feature Matching</i> antara Foto 1 dengan Foto 2	59
Gambar 4.11 Posisi Pengambilan Foto	60
Gambar 4.12 Tampak Depan Data <i>SfM</i>	60
Gambar 4.13 Tampak Samping Data <i>SfM</i>	61

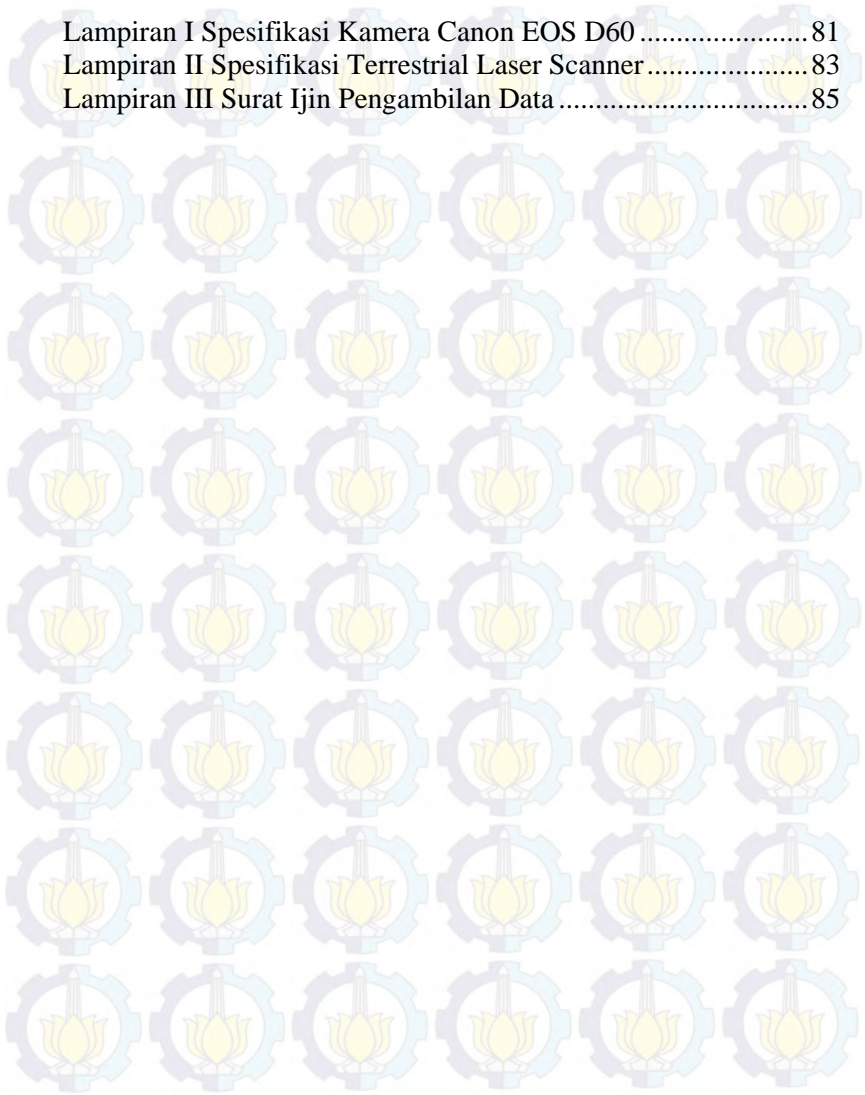
Gambar 4.14 Tampak Atas Data <i>SfM</i>	61
Gambar 4.15 Data CS_03 (Kiri) dan CS_04 (Kanan).....	65
Gambar 4.16 Grafik Registrasi.....	66
Gambar 4.17 Densitas titik data TLS	67
Gambar 4.18 Grafik Fitur yang terdeteksi pada tiap foto.....	69
Gambar 4.19 Foto 18.....	69
Gambar 4.20 Foto 4 (Kiri) dan Foto 45 (Kanan).....	70
Gambar 4.21 Grafik <i>Feature Matching</i>	70

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Koordinat Titik Kontrol	51
Tabel 4.2 Koordinat GCP	52
Tabel 4.3 Koordinat ICP	52
Tabel 4.4 Hasil Kalibrasi Kamera	57
Tabel 4.5 Hasil Feature Detection	58
Tabel 4.6 Koordinat ICP TLS	63
Tabel 4.7 Koordinat ICP SfM	63
Tabel 4.8 Kesalahan Kerangka Kontrol	64
Tabel 4.9 Nilai RMS Error Registrasi	65
Tabel 4.10 Nilai RMS Error	71
Tabel 4.11 Hasil Uji t student pada koordinat X	72
Tabel 4.12 Hasil Uji t student pada koordinat Y	73
Tabel 4.13 Hasil Uji t student pada koordinat Z	73
Tabel 4.14 Hasil Analisa ICP	74

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I Spesifikasi Kamera Canon EOS D60	81
Lampiran II Spesifikasi Terrestrial Laser Scanner	83
Lampiran III Surat Ijin Pengambilan Data	85





BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Indonesia merupakan negara dengan berbagai peninggalan bersejarah, yang salah satunya adalah Candi Singosari. Candi ini dibangun pada abad ke-13 dan merupakan ikon peninggalan bersejarah milik Kerajaan Singosari (Sayekti, Amiuzza, & Sujudwijono, 2014). Pada awalnya Candi Singosari digunakan sebagai tempat peribadatan dan pemujaan, tetapi sekarang candi ini telah dilestarikan dan menjadi tempat wisata. Pajak hiburan Kabupaten Malang pada tahun 2011 memiliki kontribusi sebesar 9,67% (Rp. 6.252.826.091). Pajak hiburan merupakan kontributor kedua terbesar bagi PAD (pendapatan asli daerah) Kabupaten Malang, di mana Candi Singosari merupakan salah satu bagian dari fasilitas hiburan (Prameka, 2013). Bangunan yang memiliki nilai budaya dan sejarah seperti Candi Singosari ini membutuhkan perlindungan dan pemeliharaan. Salah satu caranya adalah dengan melakukan dokumentasi dalam bentuk 3D.

Penggunaan metode alternatif yang relatif murah untuk melakukan pemodelan suatu bangunan, yakni dengan teknologi *Close Range Photogrammetry* (CRP) atau Fotogrametri Rentang Dekat, dengan memanfaatkan kamera *DigitalSingle Lens Reflex* (DSLR) . Dalam teknik CRP, kualitas proses penentuan koordinat dapat ditingkatkan dengan cara melakukan pembidikan ke objek secara konvergen dari kamera agar diperoleh ukuran lebih. Teknik ini mempunyai kelebihan terutama jika objek yang akan diukur sulit untuk dijangkau dan atau memiliki dimensi yang kecil (Handayani, Yuwono, & Taufik, 2015). Dengan aplikasi lain yaitu dalam penentuan volume suatu bidang (Mulia & Handayani, 2014). *Structure from Motion*

(SfM) beroperasi menggunakan prinsip dasar yang sama dengan fotogrametri tradisional, yaitu struktur 3D bisa didapatkan dari beberapa gambar yang bertampalan. Tetapi, secara dasar berbeda dengan fotogrametri tradisional, karena geometri dari lokasi, yaitu posisi kamera dan orientasi diketahui secara otomatis tanpa harus menentukan titik – titik kontrol 3D. (Snaveely, 2010). SfM ini merupakan salah satu metode yang mampu melakukan dokumentasi peninggalan bersejarah dalam bentuk 3D

Metode lain yang dapat digunakan untuk melakukan dokumentasi dalam bentuk 3D adalah *laser scanning*, yang merupakan teknik penginderaan jauh aktif yang mampu secara langsung mengukur jarak antara *laser scanner* dan target. Hasilnya adalah *3D point clouds* dengan akurasi yang tinggi. *Laser scanning*, yang dikenal sebagai *Light Detection and Ranging* (LIDAR) dapat digunakan pada beberapa platform, yang salah satunya adalah darat dan biasa disebut *Terrestrial Laser Scanning* (TLS). *3D point clouds* yang dihasilkan dapat digunakan di berbagai aplikasi, yang salah satunya adalah dokumentasi peninggalan bersejarah (Hoffmeister, Curdt, Tilly, & Bendig, 2011).

Rio Adhitia Putra pada tahun 2014 melakukan penelitian mengenai pemodelan 3D menggunakan metode TLS dengan alat Leica Scanstation C10. Peneliti menggunakan Masjid Al Irsyad Kota Baru Parahyangan sebagai objek penelitiannya. Dari hasil pengolahan data, diperoleh kesimpulan bahwa melalui survei dan pemetaan menggunakan TLS dapat menghasilkan model 3D beserta ukuran jarak dari bangunan, tetapi bentuk pada dinding masjid masih kurang sempurna akibat dari kurang rapatnya *point clouds* pada daerah tersebut (Putra, 2014). Chetan Katoch dalam penelitiannya melakukan pemodelan 3D untuk kepentingan rekonstruksi peninggalan budaya menggunakan kamera digital SLR Nikon D80. Peneliti

menggunakan Biara Mindrolling yang berada di India Utara sebagai objek penelitiannya. Peneliti menggunakan beberapa *software* fotogrametri jarak dekat, yaitu PMVS, Autodesk 123D Catch dan Photomodeler yang kemudian dibandingkan ketelitiannya. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa Autodesk 123D Catch, *software* berbasis *SfM* memiliki akurasi orientasi yang lebih tinggi dari pada PhotoModeller, yang merupakan *software* profesional dalam pemodelan 3D (Katoch, 2013).

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemodelan 3D dengan menggunakan metode *Structure from Motion* (SfM) dan metode *Terrestrial Laser Scanning* (TLS). Koordinat (X, Y, Z) ICP (*Independent Check Point*) dari kedua model tersebut akan di analisa perbedaannya dengan menggunakan *total station* sebagai data pembandingnya. Penelitian ini diharapkan mampu memberi pengetahuan mengenai metode *Terrestrial Laser Scanning* dan *Structure from Motion* dalam melakukan dokumentasi peninggalan bersejarah.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang ingin diselesaikan dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana cara membuat visualisasi 3D model dari Candi Singosari dengan menggunakan metode *Structure from Motion* dan *Terrestrial Laser Scanning*?
2. Bagaimana ketelitian (akurasi) koordinat (X, Y, Z) ICP dari kedua model tersebut apabila dibandingkan dengan koordinat ICP yang didapat dari *total station*?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Peninggalan bersejarah yang akan dijadikan objek penelitian adalah Candi Singosari yang berada di Desa

Candi Renggo, Kecamatan Singosari, Kabupaten Malang.

2. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Structure from Motion* dan *Terrestrial Laser Scanning*.
3. Kamera yang akan digunakan adalah Canon EOS 60D.
4. *Terrestrial laser scanner* yang akan digunakan adalah GeoMax Zoom 300.
5. Analisa akan dilakukan terhadap perbedaan koordinat (X, Y, Z) ICP dari kedua model yang dihasilkan
6. Data pembanding yang digunakan adalah koordinat (X, Y, Z) ICP yang didapat menggunakan *total station*.

1.4

Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Membuat visualisasi 3D model dari Candi Singosari dengan menggunakan metode *Structure from Motion* dan *Terrestrial Laser Scanning*.
2. Melakukan analisa terhadap koordinat (X, Y, Z) ICP dari kedua model yang dihasilkan berdasarkan ukuran *total station*.

1.5

Manfaat

Manfaat yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah memberi pengetahuan mengenai perbedaan antara metode *Terrestrial Laser Scanning* dan *Structure from Motion* dalam melakukan dokumentasi 3D peninggalan bersejarah. Model 3D yang dihasilkan bisa digunakan sebagai arsip yang nantinya akan berguna apabila harus dilakukan rekonstruksi. Model 3D yang dihasilkan juga bisa digunakan sebagai sarana promosi bagi Kabupaten Malang untuk menarik berbagai wisatawan dan diharapkan mampu memberi peningkatan di sektor hiburan Kabupaten Malang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fotogrametri Jarak Dekat

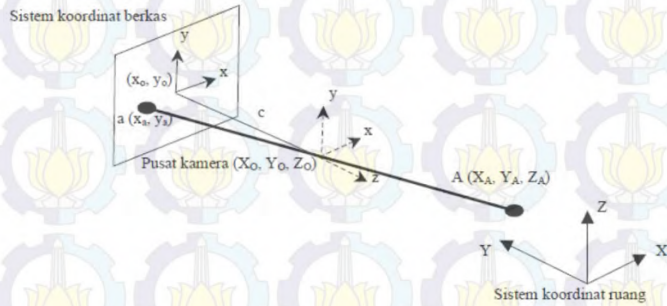
Fotogrametri adalah seni, ilmu, dan teknologi untuk mendapatkan informasi yang terpercaya mengenai objek fisik dan lingkungan melalui proses perekaman, pengukuran dan interpretasi gambar fotografik dan pola radiasi energi elektromagnetik dan fenomena lainnya (Thompson, 1980). Metode fotogrametri merupakan suatu metode pengukuran terhadap suatu objek yang dilakukan tanpa perlu bersentuhan langsung dengan objek yang diukur. Pengukuran terhadap objek dilakukan pada data yang diperoleh dengan perekaman citra pada suatu sensor yang digunakan.

2.1.1 Prinsip Dasar Fotogrametri Jarak Dekat

Pada saat sebuah foto diambil, berkas sinar dari objek akan menjalar menyerupai garis lurus menuju pusat lensa kamera hingga mencapai bidang film. Kondisi di mana titik objek pada dunia nyata, titik pusat proyeksi, dan titik obyek pada bidang foto terletak satu garis dalam ruang dinamakan kondisi kesegarisan berkas sinar atau kondisi kolinearitas (*collinearity condition*). Kondisi ini merupakan syarat fundamental dalam fotogrametri (Atkinson, 1996).

Dalam fotogrametri, posisi dari sebuah objek pada ruang didefinisikan pada sistem koordinat kartesian 3D. Pada awalnya, objek terdefinisi pada sistem koordinat berkas. Kemudian dilakukan transformasi koordinat untuk mendapatkan koordinat objek pada sistem koordinat tanah. Antara kedua sistem koordinat itu terdapat perbedaan orientasi dan skala sehingga,

transformasi koordinat terdiri dari translasi, rotasi dan perubahan skala.



Gambar 2.1 Kondisi Kesegaran (*Colinearity Condition*)

Sumber: (Atkinson, 1996)

Pusat dari sistem koordinat berkas merupakan pusat dari lensa kamera, yang dikenal dengan nama pusat perspektif (*perspective center*). Titik pusat lensa kamera diketahui, sehingga berkas sinar dari objek yang melewati pusat lensa kamera akan jatuh pada sebuah titik pada bidang foto yang dapat diketahui koordinat fotonya. Perhatikan Gambar 2.1., X_0, Y_0, Z_0 merupakan titik pusat kamera, $x_a, y_a, -c$ merupakan koordinat sebuah titik A pada sistem koordinat berkas, dan X_A, Y_A, Z_A merupakan koordinat titik A pada sistem koordinat tanah, maka persamaan kolinearitas adalah (Atkinson, 1996):

$$\begin{aligned} x_a &= -c \frac{[r_{11}(X_0 - X_A) + r_{12}(Y_0 - Y_A) + r_{13}(Z_0 - Z_A)]}{[r_{31}(X_0 - X_A) + r_{32}(Y_0 - Y_A) + r_{33}(Z_0 - Z_A)]} \\ y_a &= -c \frac{[r_{21}(X_0 - X_A) + r_{22}(Y_0 - Y_A) + r_{23}(Z_0 - Z_A)]}{[r_{31}(X_0 - X_A) + r_{32}(Y_0 - Y_A) + r_{33}(Z_0 - Z_A)]} \end{aligned} \quad (2.1)$$

dengan c merupakan *principal distance*, dan r_{ij} merupakan elemen dari matriks rotasi. Rumus di atas merupakan rumus kolinearitas dengan elemen dan matriks rotasi diberikan pada persamaan berikut:

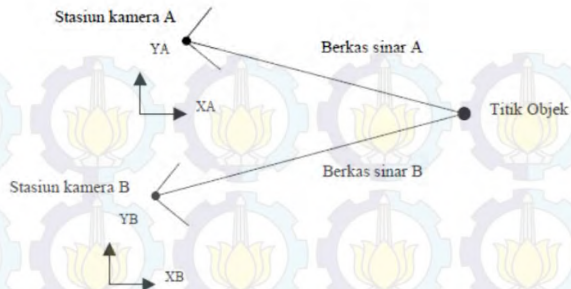
$$R = R_{\omega} R_{\varphi} R_k$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos k & \sin \omega \sin \varphi \cos k + \cos \omega \sin k & -\cos \omega \sin \varphi \cos k + \sin \omega \sin k \\ -\cos \varphi \sin k & -\sin \omega \sin \varphi \cos k + \cos \omega \sin k & \cos \omega \sin \varphi \cos k + \sin \omega \sin k \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

R_k merupakan rotasi terhadap sumbu z , R_{ω} adalah rotasi terhadap sumbu x , sedangkan R_{φ} rotasi terhadap sumbu y . Rumus di atas membutuhkan nilai – nilai yang didapat dari proses reseksi spasial.

2.1.2 Interseksi Spasial (*Intersection*)

Untuk mendapatkan posisi objek pada dunia nyata, maka diperlukan berkas sinar objek yang sama dari foto lainnya (Leitch, 2010). Kedua berkas sinar akan berpotongan pada objek yang sama di dunia nyata. Perpotongan ini dinamakan interseksi spasial (Atkinson, 1996). Jika terdapat titik A di lapangan yang dapat diamati dari 2 foto, maka di setiap foto akan terdapat bayangan titik tersebut. Apabila diketahui posisi kamera dan arah sumbu optiknya maka perpotongan sinar garis dari foto 1 dan foto 2 akan dapat menentukan posisi koordinat titik P tersebut (Wolf, 2000). Prinsip penentuan posisi dari perpotongan sinar ini dikenal dengan interseksi spasial.



Gambar 2.2 Interseksi Spasial
Sumber: (Leitch, 2010)

2.2

Kalibrasi Kamera

Kamera non-metrik tidak mempunyai lensa yang sempurna, sehingga proses perekaman yang dilakukan akan memiliki kesalahan. Oleh karena itu perlu dilakukan pengkalibrasian kamera untuk dapat menentukan besarnya penyimpangan-penyimpangan yang terjadi. Sebagaimana dijabarkan oleh Atkinson bahwa kalibrasi kamera memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Evaluasi dari kinerja kamera
2. Evaluasi dari stabilitas lensa
3. Penentuan parameter optik dan geometrik dari sebuah lensa
4. Penentuan parameter optik dan geometrik dari sistem lensa kamera
5. Penentuan parameter optik dan geometrik dari sistem akuisisi data citra

Kalibrasi kamera dilakukan untuk menentukan parameter internal kamera (IOP) meliputi *principal distance* (c), titik pusat fidusial foto (x_o, y_o), distorsi lensa (K_1, K_2, K_3, P_1 and P_2), serta distorsi akibat perbedaan penyekalaan dan ketidak ortogonal antara sumbu X dan Y (b_1, b_2) (Fraser, 1997).

Distorsi lensa dapat menyebabkan bergesernya titik pada foto dari posisi yang sebenarnya, sehingga memberikan ketelitian pengukuran yang tidak baik, namun tidak mempengaruhi kualitas ketajaman citra yang dihasilkan. Distorsi lensa dapat dibagi menjadi distorsi radial dan distorsi tangensial.

Menurut Wigrata (1986) distorsi radial adalah pergeseran linier titik foto dalam arah radial terhadap titik utama dari posisi idealnya. Distorsi lensa biasa diekspresikan sebagai fungsi polinomial dari jarak radial (dr) terhadap titik utama foto. Distorsi radial direpresentasikan dalam sebuah persamaan polinomial sebagai berikut (Wolf, 2000):

$$\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \quad (2.3)$$

Di mana istilah dari Δr adalah jumlah dari distorsi lensa radial, r adalah jarak radial dari *principal point*, dan K_1 , K_2 , K_3 merupakan koefisien polinomial dari distorsi radial. Efek yang terjadi apabila pada kamera memiliki nilai distorsi, maka gambar foto yang dihasilkan akan berbentuk cembung atau cekung, tergantung dari nilai parameter distorsi radial bernilai positif atau negatif (Wolf, 2000).

Menurut Wigrata (1986) distorsi tangensial adalah pergeseran linier titik di foto pada arah normal (tegak lurus) garis radial melalui titik foto tersebut. Distorsi tangensial disebabkan kesalahan sentring elemen-elemen lensa dalam satu gabungan lensa di mana titik pusat elemen-elemen lensa dalam gabungan lensa tersebut tidak terletak pada satu garis lurus. Pergeseran ini biasa dideskripsikan dengan 2 persamaan polinomial untuk pergeseran pada arah x (Δx) dan y (Δy) (Atkinson, 1996).

$$\begin{aligned}\Delta_x &= P_1[r^2 + 2(x - x_0)^2 + 2P_2(x - x_0)(y - y_0)] \\ \Delta_y &= P_1[r^2 + 2(x - x_0)^2 + 2P_2(x - x_0)(y - y_0)]\end{aligned}\quad (2.4)$$

Di mana P_1 dan P_2 merupakan koefisien dari parameter distorsi tangensial yang nilainya tergantung dari nilai panjang fokus kamera. Efek dari distorsi tangensial ini akan menyebabkan kesan hiperbolik pada foto yang terekam oleh kamera.

Berdasarkan lokasi, kalibrasi kamera dapat dilakukan dengan metode *laboratory calibration* serta *on the-job calibration*. *Laboratory calibration* dilakukan di laboratorium, terpisah dengan proses pemotretan objek. Metode yang termasuk di dalamnya antara lain *optical laboratory* dan *test range calibration*. Secara umum metode ini sesuai untuk kamera jenis metrik. Metode ini terdiri dari metode multikolimator dan *goniometer* di mana masing – masing memerlukan alat yang khusus dan mahal. Pada metode multikolimator, objek (berupa tanda silang kotak) yang akan dipotret diletakkan di atas sebuah pelat kaca, yang diproyeksikan melalui sejumlah kolimator individual yang dipasang dengan sudut θ tertentu (nilainya sudah diketahui) ke bidang fokus kamera. Dari tanda silang kotak yang terproyeksi pada bidang fokus dapat diukur panjang fokus ekivalen dan radial lensa pada tiap pertambahan sudut θ .

Pada metode *goniometer*, objek berupa pelat grid yang disinari dari belakang. Grid ini kemudian diproyeksikan melalui lensa kamera pada arah berlawanan. Sudut di mana sinar grid yang timbul, diukur dengan *goniometer*. Besarnya panjang fokus ekivalen dan distorsi radial lensa ditentukan dengan membandingkan sudut terukur sebenarnya terhadap sudut yang benar menurut teori.

On-the-job calibration merupakan teknik penentuan parameter kalibrasi lensa dan kamera yang dilakukan bersamaan dengan pelaksanaan pemotretan objek.

Berdasarkan waktu, kalibrasi kamera dapat dilakukan sebelum pemotretan, pada saat pemotretan, maupun sesudah pemotretan. Kalibrasi sebelum maupun sesudah pemotretan, biasa dilakukan di laboratorium atau di lokasi pemotretan. Kalibrasi pada saat pemotretan dikenal dengan *self-calibration*, yakni mengkalibrasi kamera sekaligus pada objek amat dan data diambil bersamaan dengan data observasi. Pada *self-calibration* pengukuran titik-titik target pada objek pengamatan digunakan sebagai data untuk penentuan titik objek sekaligus untuk menentukan parameter kalibrasi kamera (Atkinson, 1996).

Menurut Fryer (1989), metode kalibrasi berdasarkan jenis target antara lain dengan *analytical plumb-line calibration* dan *stellar calibration*.

2.3 Structure from Motion

Structure from Motion (SfM) beroperasi menggunakan prinsip dasar yang sama dengan fotogrametri tradisional, yaitu struktur 3D bisa didapatkan dari beberapa gambar yang bertampalan. Tetapi, secara dasar berbeda dengan fotogrametri tradisional, karena geometri dari lokasi, yaitu posisi kamera dan orientasi diketahui secara otomatis tanpa harus menentukan titik – titik kontrol 3D. Hal ini diselesaikan secara bersamaan menggunakan prosedur *bundle adjustment* yang iteratif, berdasarkan *database* dari fitur yang diambil secara otomatis dari beberapa gambar yang bertampalan (Snavely, 2010). Metode ini paling cocok digunakan untuk sekumpulan gambar dengan tingkat *overlap* tinggi yang menangkap struktur tiga dimensi secara keseluruhan dari lokasi yang dilihat dari berbagai macam posisi, atau sesuai dengan namanya, gambar yang didapat dari sensor yang

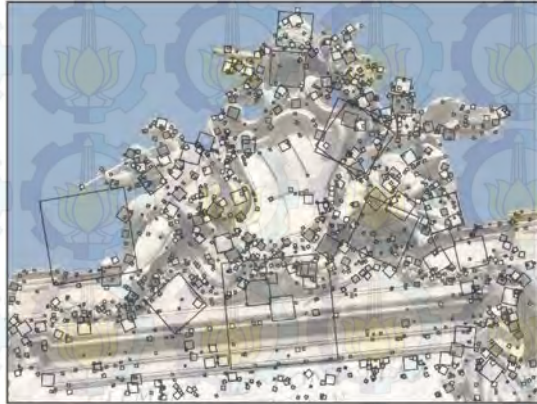
bergerak (Westoby, Brasington, Glasser, Hambrey, & Reynolds, 2012).

Metode SfM tidak memerlukan reseksi dalam pengerjaannya. Posisi kamera dan geometri dari lokasi direkonstruksi secara bersamaan melalui identifikasi secara otomatis dari fitur yang sama dalam beberapa gambar. Fitur ini dilacak dari gambar ke gambar, memungkinkan perkiraan awal dari posisi kamera dan koordinat objek yang nantinya diperbaiki secara iteratif menggunakan minimalisasi least-square yang non-linear (Snavely, 2010).

2.3.1 *Feature Extraction*

Permasalahan utama dalam SfM adalah penentuan lokasi 3D dari fitur yang cocok dalam beberapa foto yang diambil dari sudut yang berbeda. Langkah awal sebagai solusi dari permasalahan ini adalah mengidentifikasi fitur dalam tiap foto yang mungkin digunakan sebagai korespondensi gambar. Solusi yang populer untuk permasalahan ini, dan digunakan oleh Snavely (2008) adalah sistem pengenalan objek *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT). SIFT ini mengidentifikasi fitur di tiap gambar yang tetap pada *scaling* dan rotasi gambar dan yang sedikit berubah pada kondisi iluminasi dan sudut pandang 3D kamera. Titik yang unik, atau '*keypoints*', diidentifikasi secara otomatis di seluruh skala dan lokasi pada tiap gambar, diikuti dengan pembuatan *feature descriptor*, yang dihitung dengan mentransformasikan gradien gambar lokal ke dalam representasi yang sangat tidak sensitif terhadap berbagai iluminasi dan orientasi (Lowe, 2004). Gambar 2.3 merupakan contoh dari fitur SIFT yang terdeteksi. Tiap fitur SIFT yang

terdeteksi ditampilkan dengan kotak hitam di mana tengahnya merupakan lokasi dari fitur.



Gambar 2.3 Contoh fitur *SIFT* yang terdeteksi
Sumber: (Snavely, 2010)

2.3.2 *Feature Matching*

Setelah fitur dideteksi pada tiap gambar, sistem mencocokkan fitur di tiap pasangan gambar. $F(I)$ menyatakan sekumpulan fitur yang ditemukan pada gambar I . Untuk sepasang gambar I dan J , sistem meninjau tiap fitur $f \in F(I)$ dan menemukan *nearest neighbor*-nya (dalam bentuk ruang) $f_{nn} \in F(J)$:

$$f_{nn} = \arg \min ||f_d - f'_d||_2 \quad (2.5)$$

Di mana:

- f_{nn} : fitur yang cocok (*matching feature*)
- $\arg \min$: fungsi *argument of minimum*
- f_d : vektor *feature descriptor* gambar 1
- f'_d : vektor *feature descriptor* gambar 2

Setelan mencocokkan fitur di I ke J, tiap fitur $f \in F(I)$ akan dipasangkan dengan fitur yang paling cocok di $F(J)$. Tetapi, tiap fitur di $F(J)$ mungkin berpasangan dengan banyak fitur di $F(I)$, karena sebuah fitur di $F(J)$ mungkin memiliki nilai yang sama dengan beberapa fitur di $F(I)$. Koresponden yang sebenarnya harus dalam bentuk satu ke satu, oleh karena itu beberapa dari pasangan yang salah akan dibuang. Apabila setelah langkah ini sepasang gambar memiliki jumlah pasangan yang lebih sedikit dari batas minimum, gambar dinyatakan tidak berpasangan dan seluruh pasangan fiturnya dibuang (Snavely, 2010).

2.4

Terrestrial Laser Scanning

Terrestrial Laser Scanning (TLS) adalah sebuah teknik menggunakan cahaya laser untuk mengukur titik-titik dalam sebuah pola secara langsung dalam tiga dimensi dari yang ada pada permukaan objek dari sebuah tempat di permukaan bumi. Hasil yang didapatkan dari pengukuran TLS ini adalah *point clouds* yang berkoordinat tiga dimensi terhadap tempat berdiri alat. *Point clouds* tersebut adalah kumpulan titik-titik dalam jumlah banyak yang dapat digunakan sebagai bahan pembuatan model tiga dimensi. TLS ini mempunyai kekurangan yaitu ketidakmampuan TLS dalam mengakuisisi warna yang sesuai dengan warna aslinya. Warna yang didapatkan oleh alat TLS adalah intensitas pantulan dari benda yang ditembak oleh laser tersebut (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

Menurut (Reshetyuk, 2009), TLS memiliki beberapa keunggulan bila dibandingkan dengan teknik survei tradisional lainnya seperti tachimetri, GPS, dan fotogrametri, yaitu:

1. Menangkap geometri suatu objek dalam 3-D secara langsung, cepat dan detil.
2. Dapat memangkas biaya dan dapat menyelesaikan pekerjaan jauh lebih cepat.
3. Dapat digunakan pada daerah survei atau objek yang sulit dijangkau dan berbahaya di mana teknik survei tradisional sangat sulit untuk dilakukan.
4. Tidak memerlukan cahaya untuk dapat mengakuisisi data.
5. Pemindaian yang secara lengkap dan komprehensif.
6. Data dapat digunakan untuk saat ini dan masa yang akan mendatang.

TLS juga memiliki kekurangan, yaitu tidak mampu untuk mengambil warna sesuai dengan warna tampak objek, melainkan warna yang didapatkan hanya warna intensitas dari gelombang pantulan (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

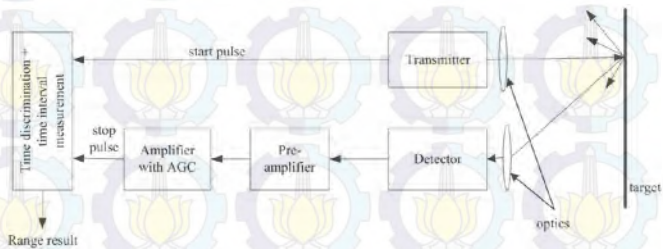
2.5.1 Prinsip Pengukuran TLS

TLS mempunyai suatu sistem pengukuran yang terdapat di dalamnya, yaitu sistem pengukuran jarak dan sistem pengukuran sudut. Sistem pengukuran ini digunakan untuk mendapatkan koordinat *point clouds*.

Laser *rangefinder* merupakan suatu komponen TLS yang paling berperan dalam melakukan pengukuran jarak. Pulsa laser *rangefinder* terdiri dari:

1. *Transmitter* atau pemancar pulsa
2. Penerima pulsa (terdiri dari detektor, penguat sinyal, dan *Automatic Gain Control* (AGC))
3. Pengukur waktu elektronik, unit pengukur waktu (*Time- to-digital converter* (TDC))
4. Pemancar dan penerima optis.

Mekanisme pengukuran berbasis pulsa dari laser *rangefinder* yaitu pemancar laser memancarkan dalam pulsa pendek yang terbagi menjadi dua bagian, satu dipancarkan ke penerima sinyal untuk mengaktifkan unit pengukur waktu elektronis, satu lagi dipancarkan ke objek. Ketika laser yang dipancarkan menyentuh objek, laser tersebut akan terhamburkan dan sebagian ada yang kembali ke detektor. Di dalam detektor kekuatan pancaran pulsa akan dikonversikan menjadi arus listrik yang kemudian akan diterima dan diteruskan oleh penguat sinyal yang disebut diskriminator waktu. Saat arus listrik mencapai diskriminator waktu, hal tersebut menandakan waktu kembalinya pulsa dan akan menghentikan pengukuran waktu. Interval waktu antara pulsa dipancarkan hingga kembali digunakan untuk menghitung jarak antara alat TLS dengan objek. Mekanisme pengukuran menggunakan TLS berbasis pulsa akan diilustrasikan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Mekanisme pengukuran TLS
Sumber: (Reshetyuk, 2009)

Menurut Reshetyuk (2009), perhitungan jarak dengan TLS berbasis pulsa mengikuti pada persamaan 2.6.

$$R = \frac{c \cdot t}{2} \quad (2.6)$$

dengan:

R : jarak antara TLS dengan objek (m);

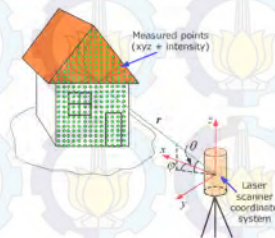
c : kecepatan cahaya di udara ($\approx 3 \cdot 10^8$ m/s);

t : waktu tempuh laser ketika dipancarkan hingga diterima (s).

Selain sistem pengukuran jarak, TLS juga mempunyai sistem pengukuran sudut yang dapat digunakan untuk mendapatkan koordinat objek. Sistem pengukuran sudut terdiri dari *angular recorders* yang berfungsi untuk mengukur arah horizontal dan sudut vertikal sinar laser TLS ke objek. Untuk mendapatkan nilai koordinat objek dengan menggunakan TLS, adapun beberapa parameter yang diukur dalam setiap objek, yaitu:

1. jarak R (m);
2. arah horizontal (ϕ);
3. sudut vertikal θ ($^\circ$).

Selain melakukan ketiga pengukuran di atas terhadap setiap objek, TLS juga melakukan pengukuran intensitas pantulan sinar laser dari setiap *point clouds*. Prinsip pengukuran TLS akan diilustrasikan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Prinsip pengukuran TLS

Sumber: (Reshetyuk, 2009)

Hubungan antara data pengamatan (r , φ , θ) dan koordinat (e , n , u) dapat dituliskan dalam persamaan 2.7 (Reshetyuk, 2009):

$$X_i = \begin{bmatrix} e_j \\ n_j \\ u_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_j \cos \varphi_j \cos \theta_j \\ r_j \sin \varphi_j \cos \theta_j \\ r_j \sin \theta_j \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

dengan:

r_j : jarak hasil pengukuran waktu tempuh laser ke objek (m)

φ_j : sudut horizontal antara arah bidikan laser dengan sumbu-e alat ($^\circ$)

θ_j : sudut vertikal antara bidang horizontal dengan arah bidikan laser ($^\circ$)

e_j : koordinat *e point clouds* dalam sistem koordinat alat (m)

n_j : koordinat *n point clouds* dalam sistem koordinat alat (m)

u_j : koordinat *u point clouds* dalam sistem koordinat alat (m)

2.5.2 Klasifikasi Terrestrial Laser Scanner

Terrestrial Laser Scanner (TLS) dibagi ke dalam dua kategori utama, yaitu TLS Dinamis dan TLS Statis. TLS Dinamis merupakan tipe TLS yang pengukurannya atau penggunaannya dilakukan dari atas wahana atau kendaraan yang bergerak. Penggunaan TLS dinamis ini lebih difokuskan kepada citra yang diperoleh dengan menggunakan beberapa video dan kamera digital yang dioperasikan secara bersamaan untuk tujuan geo-referensi langsung dan diintegrasikan dengan sistem GPS/IMU sebagai koreksi langsung data pengukuran (Adhitiaputra, 2013). TLS dinamis

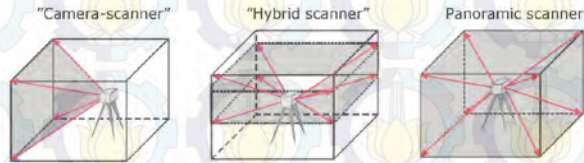
dapat digunakan untuk pemindaian darat ketika wahana yang digunakan bergerak atau juga dapat disebut *vehicle laser scanning*.

TLS Statis merupakan tipe TLS untuk pengukuran objek topografi yang pengukurannya dilakukan dari posisi yang tetap/diam. TLS ini melakukan pengukuran dengan mengukur jarak miring yang dilakukan dengan menggunakan laser *rangefinder* dan dua sudut yang berasosiasi dengan *encoder* sudut pada bidang horizontal dan vertikal melewati pusat dari alat. Biasanya penggunaan TLS jenis ini digunakan dalam pengukuran terhadap objek yang diam.

TLS jenis statis dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa kategori, seperti ditinjau dari prinsip pengukuran, cakupan pemindaian, dan jarak tempuh laser yang digunakan. Berdasarkan prinsip pengukurannya Pengukuran jarak dengan TLS dilakukan menggunakan laser *rangefinder* dengan prinsip pengukuran berbasis pulsa atau beda fase. *Pulse Based* TLS memiliki tipe pengukuran jarak dengan menggunakan waktu tempuh laser mulai dipancarkan hingga kembali lagi ke alat. TLS ini dapat digunakan untuk pengukuran dengan jarak objek yang cukup jauh. *Phase Difference Based* TLS memiliki tipe pengukuran jarak dengan menggunakan perbedaan fase laser saat dipancarkan dengan saat laser diterima kembali oleh alat. TLS ini biasanya hanya digunakan pada pengukuran dengan jarak yang cukup dekat, namun memiliki tingkat presisi yang lebih baik bila dibandingkan dengan TLS berbasis pulsa (Putra, 2014).

Berdasarkan cakupan pemindaian atau *Field of View* (FOV) terdapat tiga jenis TLS, yaitu

Panoramic Scanner, Hybrid Scanner, dan Camera Scanner. Perbedaan dari tiga jenis TLS dalam kategori ini akan diilustrasikan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Perbedaan 3 jenis TLS

Sumber: (Reshetyuk, 2009)

2.5.3 Teknik Registrasi Data

Karena kebanyakan objek tidak bisa di *scan* dari satu sudut pandang, dikarenakan hambatan dan halangan penglihatan, *laser scanner* harus di posisikan pada lokasi yang berbeda agar bisa melakukan *scan* secara keseluruhan. Data yang di dapat *laser scanner* dari setiap sudut pandang mengacu kepada sistem koordinat lokal. Tujuannya adalah melakukan transformasi yang menyatukan referensi koordinat dari beberapa data, yang biasa disebut registrasi. Transformasi antara dua sistem koordinat yang berbeda \vec{x}_g dan \vec{x}_l bisa di deskripsikan secara matematis menggunakan *rigid body transformation* (Schluz, 2007).

$$\vec{x}_g = R \cdot \vec{x}_l + \vec{t} \quad (2.8)$$

Di mana:

\vec{x}_g : vektor koordinat dalam sistem koordinat global

\vec{x}_l : vektor koordinat dalam sistem koordinat lokal

R : matriks rotasi

\vec{t} : komponen translasi

Selanjutnya, faktor skala, atau matriks skala dari sumbu yang berbeda bisa diberikan. Biasanya, matriks rotasi merupakan matriks yang ortogonal, di mana harus memenuhi 3 syarat (Schluz, 2007).

$$\begin{aligned} R^T &= R^{-1} \\ R \cdot R^T &= R^T \cdot R = I \\ \det R &= \pm 1 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Di mana:

R : Matriks rotasi

R^T : tranpose dari matrks rotasi

R^{-1} : inverse dari matriks rotasi

Ada beberapa metode registrasi data *point clouds* yang bisa digunakan, teknik registrasi yang dipilih akan mempengaruhi teknik survei yang akan dilakukan nantinya sehingga harus dipilih dengan seksama berdasarkan kondisi objek dan area di sekitar objek (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

1. *Target to target registration*

Metode registrasi ini adalah metode registrasi yang umum digunakan. Target yang digunakan dalam metode ini adalah target yang mempunyai reflektivitas tinggi dan dapat dikenali oleh alat sebagai target. Target tersebut digunakan sebagai titik ikat dari dua atau lebih tempat berdiri alat. Titik ikat tersebut yang menggabungkan kedua tempat berdiri alat sehingga mempunyai arah orientasi relatif yang sama.

2. *Cloud to cloud registration*

Registrasi ini menggunakan minimal 3 titik sekutu yang dimiliki dari kedua hasil *scan*. Konsep registrasi ini menggunakan metode *iterative closest point* (ICP). Maksud dari konsep ini adalah mencari *offset* atau jarak terdekat secara berulang – ulang dari kedua titik yang terdekat antara kedua kumpulan *point clouds*. Walaupun titik minimal yang diperlukan berjumlah 3 titik, namun untuk mendapatkan ketelitian yang baik, pertampalan dari *point clouds* harus di atas 60% sehingga akan menambah beban kerja pada proses pengambilan data.

3. *Traversing*

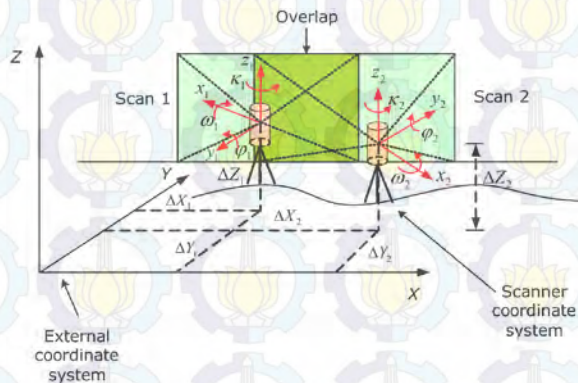
Registrasi *traversing* menggunakan tempat berdiri alat sebagai titik sekutu dan memerlukan satu titik referensi sebagai titik awal *backsight*. Keunggulan metode ini adalah lebih cepat dalam menyelesaikan survei karena waktu untuk persiapan alat dan target tidak terlalu lama. Akan tetapi metode ini biasanya memberikan ketelitian pengukuran yang lebih rendah dibandingkan dengan metode lainnya.

2.5.4 Georeferencing

Dalam pengukuran dengan *laser scanner*, diperlukan model yang memiliki koordinat yang telah bergeoreferensi (koordinat yang mengacu pada sistem koordinat bumi) (Nugraha, 2013). Untuk mendapatkan data yang bergeoreferensi, maka diperlukan titik referensi yang memiliki koordinat geodetik dengan ketelitian yang baik. Ketelitian yang baik diperlukan karena ketelitian

dari titik referensi akan mempengaruhi ketelitian nilai koordinat dari semua titik yang dihasilkan oleh pengukuran *laser scanner* (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

Untuk melakukan *georeferencing*, terdapat dua cara yang umum digunakan dalam pengukuran dengan *laser scanner*, yaitu *known backsight* dan *known azimuth*. Seperti namanya, pada *known backsight*, yang diperlukan adalah dua buah titik referensi yang koordinatnya diketahui di mana yang satu berfungsi sebagai titik awal dan yang satu lagi berfungsi sebagai titik *backsight*. Sedangkan pada *known azimuth*, yang perlu diketahui hanyalah nilai koordinat titik awal dan nilai *azimuth* dari titik awal ke titik lainnya. Untuk penggunaan kedua metode tersebut di lapangan, kedua titik tersebut harus dapat terlihat satu sama lain (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).



Gambar 2.7 Hubungan sistem koordinat pada TLS

Sumber: (Reshetyuk, 2009)

Berikut adalah notasi yang digunakan dalam melakukan *georeferencing* (Reshetyuk, 2009):

$$X_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$$

$$X_g = [x_g \ y_g \ z_g]^T$$

$$X_e = [X \ Y \ Z]^T$$

$$\Delta X = [\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]^T$$

$$R = R_3(\kappa) \cdot R_2(\phi) \cdot R_1(\omega)$$

$$R_1(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}$$

$$R_2(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix}$$

$$R_3(\kappa) = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2.10)

Di mana:

X_i : vektor koordinat dalam sistem koordinat *scanner*

X_g : vektor koordinat dalam sistem koordinat global

X_e : vektor koordinat dari titik dalam sistem koordinat eksternal (geodetik)

ΔX : vektor translasi

R : matriks rotasi

$R_1(\omega)$: matriks rotasi dari sumbu koordinat x

$R_2(\phi)$: matriks rotasi dari sumbu koordinat y
 $R_3(\kappa)$: matriks rotasi dari sumbu koordinat z
 ω : fungsi rotasi sudut dari koordinat x
 ϕ : fungsi rotasi sudut dari koordinat y
 κ : fungsi rotasi sudut dari koordinat z

Secara matematis, *georeferencing* dapat dilakukan dengan 2 langkah, yaitu:

1. Transformasi $X_i \rightarrow X_g$:

$$X_g = \Delta X_{ig} + R_{ig} X_i \quad (2.11)$$

2. Transformasi $X_g \rightarrow X_e$:

$$X_e = \Delta X_{ge} + R_{ge} X_g \quad (2.12)$$

Gabungan dari persamaan (2.11) dan (2.12) adalah:

$$X_e = \Delta X_{ge} + R_{ge} (\Delta X_{ig} + R_{ig} X_i) \quad (2.13)$$

Di mana:

ΔX_i : vektor translasi dari sistem koordinat *scanner* ke global (ig)

ΔX_i : vektor translasi dari koordinat global ke eksternal (ge)

R_{ig} : merupakan matriks rotasi dari sistem koordinat *scanner* ke global (ig)

R_{ge} : merupakan matriks rotasi dari sistem koordinat global ke eksternal (ge)

2.5.5 Rekonstruksi Permukaan dan Pemodelan

Untuk membentuk *point clouds* diawali dengan proses *data point measurement* (pengukuran data) yang dapat dilakukan dengan

menggunakan alat dan metode apapun yang dapat memberikan data bentuk dari suatu objek yang dikaji. Kemudian *data point measurement* itu menghasilkan *point – point* yang menggambarkan permukaan dari objek yang biasanya disebut dengan *point clouds*. Kemudian *point clouds* itu dapat digunakan untuk membentuk model 3D. Berikut 3 jenis model yang dapat dibentuk pada proses *3D modelling* (Barnes, 2012), yaitu:

1. *Mesh Model*

Segitiga merupakan bentuk paling sederhana yang membentuk *polygon*. *Polygonal modelling (Meshing)* di sini menggunakan *point clouds* yang sudah dibuat dari hasil *dense surface* sebelumnya. Kemudian *point clouds* tersebut ditarik garis antar dia titik (*edge*). Dari tiga *edge* yang terhubung dapat terbentuk segitiga. *Polygon* dengan empat sisi dan segitiga adalah yang sering digunakan untuk *meshing*. Karena itu sekelompok poligon yang terhubung satu sama lain dengan titik yang sama dinamakan *mesh*.

2. *Solid Model*

Solid model adalah badan 3D yang tertutup yang memiliki properti atau atribut berupa massa, volume, titik tengah gravitasi, dan momen inersia, dimulai dari solid bentuk primitif seperti bentuk kerucut, kotak, silinder dan piramid yang kemudian dimodifikasi dan dikombinasi untuk membentuk suatu bentuk baru. Dapat juga dengan menggambarkan *ekstrusi polysolid* (bentuk solid seperti menggambar *polyline* atau yang berbasis garis).

3. *Surface Model*

Surface model merupakan cangkang tipis yang tidak memiliki massa atau volume. Biasanya terbagi menjadi *procedural* dan NURBS (*non-uniform rational B-splines*). *Procedural* digunakan untuk mendapatkan pemodelan asosiatif. Sedangkan NURBS untuk dapat melakukan pemahatan dengan titik – titik kontrol simpul. Dalam pemodelan *surface*, model ini diawali dengan membuat model dasar menggunakan *mesh*, solid dan *prosedural surface* kemudian di konversi menjadi NURBS *surfaces*. Hal ini dimaksudkan tidak hanya agar dapat memanfaatkan *tools* unik dan bentuk primitif yang ditawarkan oleh solid dan *mesh model*, tapi juga kemampuan untuk mengubah bentuk yang diberikan oleh *surface* model pemodelan asosiatif dan NURBS *modelling*.

2.5.6 *Noise Filtering*

Langkah pertama dalam proses *meshing* adalah menghilangkan data *noise* dari *point clouds*. *Mesh* akan berisi segitiga yang menghubungkan *noisy point* ini untuk membenarkan *points*. Hal ini akan menghasilkan *mesh* yang penuh dengan *spike*. Oleh karena itu menghilangkan *noisy point* ini merupakan hal yang penting (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

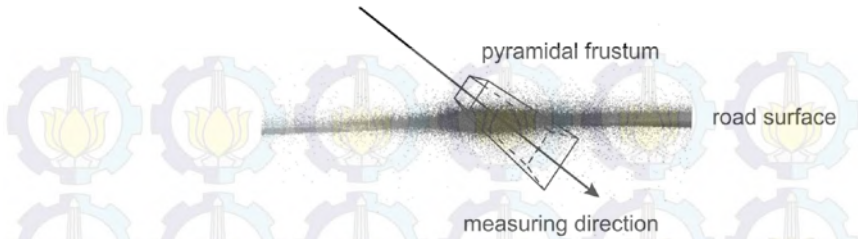
Algoritma otomatis untuk menghilangkan *noisy points* biasanya berdasarkan dua prinsip. Prinsip yang pertama adalah titik yang memiliki sedikit atau tidak ada titik lain di sekitarnya, dianggap sebagai objek asing. Mereka biasanya

berasal dari orang atau benda lain yang bergerak di depan *scanner* saat sedang proses *scanning* dan bukan merupakan bagian dari objek yang di *scan*. Titik seperti ini bisa diidentifikasi dengan mudah menggunakan beberapa setelan parameter dan dihilangkan dari *point clouds* (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

Prinsip penghilangan *noise* lainnya adalah dengan menggerakkan titik sedikit untuk mendapatkan kehalusan permukaan yang optimal. Algoritma ini mencoba untuk mencocokkan bidang secara lokal terhadap titik di *point clouds*. Ketika titik pusat berada sangat jauh dari bidang yang dicocokkan, titik pusat dipindahkan ke arah bidang sehingga memberikan konsistensi bagi tetangganya (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

Terdapat *noise filter* lainnya, beberapa yang khusus berdasarkan tipe *scanner*, yang lain menghilangkan kesalahan sistematis. Tentu saja saat menghilangkan *noisy points* harus berhati – hati. Fitur bisa hilang ketika *dataset* dihaluskan secara berlebihan atau menghilangkan terlalu banyak titik (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

Sebagai contoh, sekumpulan data yang memiliki bias bisa di lihat di gambar 2.8. *Noise* dari data umumnya disebabkan oleh sudut kecil insiden dan warna permukaan yang gelap. *Pyramidal frustum* dibuat sepanjang arah pengukuran. Tinggi dari *pyramidal frustum* di buat untuk menentukan ketebalan dari *noise*.



Gambar 2.8 Pendekatan Noise Filtering
Sumber: (Schluz, 2007)

Penghilangan *noise* dilakukan dengan merata – rata semua titik di dalam *pyramidal frustum*. Perataan berperan sebagai *low pass filtering* yang mengurangi *noise* pada sinyal. Sinyal diasumsikan sebagai nilai *mean*. Jika titik dideskripsikan oleh koordinat lokal *scanner*, maka nilai *mean* bisa dihitung dengan:

$$h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i, v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i, s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i \quad (2.14)$$

$$|h - h_i| \leq \Delta h, |v - v_i| \leq \Delta v, |s - s_i| \leq \Delta s \quad (2.15)$$

Di mana:

n : nomor dari titik di dalam *pyramidal frustum*.

h, v, s : titik yang dipilih

h_i, v_i, s_i : semua titik lain dari *point cloud*

$\Delta h, \Delta v, \Delta s$: dimensi dari *pyramidal frustum*

Secara matematis, titik dipilih menggunakan persamaan 2.15. Apabila sebuah titik berada di

dalam *pyramidal frustum*, maka titik ini ditandai sesuai (Schluz, 2007).

2.5.7 Resampling

Saat membuat *mesh*, jumlah segitiga bisa melebihi dua kali lipat dari jumlah titik. Bentuk *meshed* dari *point clouds* bisa dengan mudah membentuk sampai dengan 20 juta segitiga. Jumlah segitiga sebanyak ini bisa menjadi susah untuk dikerjakan menggunakan *hardware* yang standar. Biasanya jumlah titik harus di kurangi sebelum melakukan *meshing* dan pengurangan titik ini bisa dilakukan dengan dua cara (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

Cara yang paling mudah untuk mengurangi jumlah titik adalah dengan menghapus satu titik setiap beberapa titik lainnya. Ketika berdasarkan posisi 3D spasialnya, titik bisa dihilangkan sambil menjaga cangkupan penuhnya. Tetapi teknik ini berkemungkinan membuang titik dalam area yang memiliki fitur penting dan bisa menghilangkan informasi penting (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

Cara lain untuk mengurangi titik adalah dengan melihat kelengkungan dari permukaan untuk menentukan apakah bagian dari permukaan sudah halus atau terlalu melengkung. Teknik *resampling point clouds* ini bekerja secara pintar, menjaga titik yang berharga pada area dengan kelengkungan yang tinggi, sementara mengurangi titik di area yang bisa secara mudah direpresentasikan dengan sedikit titik. Dengan teknik ini, pengurangan yang baik dari ukuran *point clouds* bisa didapatkan tanpa kehilangan

fitur yang penting (Quintero, Genechten, Heine, & Garcia, 2008).

2.5.8 Self-Calibration of Terrestrial Laser Scanner

Kesalahan sistematis bisa terdapat pada alat *terrestrial laser scanner* modern meskipun setelah adanya kalibrasi laboratorium yang teliti oleh manufaktur. Sejumlah penelitian telah dilakukan secara independen untuk menemukan kecenderungan sistematis pada residu *laser scanner* yang memperburuk presisi dan akurasi jarak dan sudut dari pengukuran *laser scanner* (Chow, Lichti, & Teskey, 2010).

Meskipun kebanyakan dari instrumen TLS memberikan *output* informasi spasial dalam sistem koordinat kartesian (x , y , dan z), data mentah dari pengukuran menggunakan sistem koordinat bola (ρ , θ , dan α). Sistem TLS modern beroperasi seperti *total station* dengan mekanisme *scanning* tambahan. TLS mengukur arah horizontal, vertikal, dan jarak ke satu titik, dan kumpulan dari titik ini akan menghasilkan sesuatu yang dikenal sebagai *point cloud*. Sebuah kemiripan dalam instrumentasi ini memungkinkan pemodelan kesalahan sistematis dari TLS berdasarkan prinsip *total station*, yang telah banyak di eksplorasi (Chow, Lichti, & Teskey, 2010).

2.5.9 Spesifikasi Alat Zoom 300

Geomax Zoom 300 merupakan instrumen *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) yang memiliki kemampuan untuk dapat mengukur titik hingga 40,000 titik per detik. Alat ini juga dilengkapi dengan 2 buah kamera dengan resolusi 5 mega

pixel untuk setiap kameranya. Zoom 300 merupakan alat yang mudah digunakan. *Scanner* dapat dikontrol dan dioperasikan secara langsung menggunakan semua perangkat *mobile* (seperti *smartphone* atau laptop) melalui koneksi WLAN. Alat ini memiliki 4 mode *scan* dengan resolusi yang berbeda. Pengguna dapat menetapkan resolusi sesuai dengan objek atau area *scan*, sehingga waktu *scan* dan *output* data menjadi maksimal. Contoh dari alat Geomax Zoom 300 dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Geomax Zoom 300

Sumber: (www.geomax-positioning.com)

2.5

Uji Statistik *t-student*

Dalam melakukan uji hipotesis, ada banyak faktor yang menentukan, seperti apakah sampel yang diambil

berjumlah banyak atau hanya sedikit, apakah standar deviasi populasi diketahui, apakah varians populasi diketahui, metode parametrik apakah yang dipakai, dan seterusnya (Ghilani & Wolf, 2006).

Langkah – langkah untuk menguji suatu hipotesis adalah sebagai berikut:

1. Menentukan hipotesa nol (H_0) dan hipotesa alternatif (H_a). H_0 merupakan hipotesis nilai parameter yang dibandingkan dengan hasil perhitungan dari sampel. H_0 ditolak hanya jika hasil perhitungan dari sampel tidak mungkin memiliki kebenaran terhadap hipotesis yang ditentukan. H_a diterima jika H_0 ditolak.
2. Menentukan tingkat signifikansi yang digunakan. Tingkat signifikansi merupakan standar statistik yang digunakan untuk menolak H_0 . Jika ditentukan tingkat signifikansi 10% ($\alpha = 0,1$), H_0 ditolak hanya jika hasil perhitungan dari sampel sedemikian berbeda dengan nilai dugaan (yang dihipotesakan).
3. Memilih uji statistik.
4. Menentukan statistik tabel. Nilai statistik tabel dipengaruhi oleh:
 - Tingkat kepercayaan
 - Derajat kebebasan
 - Jumlah sampel yang didapat
5. Menentukan statistik hitung.
6. Mengambil keputusan.

Uji-t termasuk dalam golongan statistika parametrik. Statistik uji ini digunakan dalam pengujian hipotesis. Uji-t digunakan ketika informasi mengenai nilai varians (ragam) populasi tidak diketahui. Rumus yang digunakan dalam uji-t adalah sebagai berikut:

$$t = \frac{\Sigma d}{\sqrt{\frac{N\Sigma d^2 - (\Sigma d)^2}{N - 1}}} \quad (2.16)$$

Di mana:

t = t-hitung

Σd = Jumlah Selisih Tiap Titik

N = Jumlah Titik yang Digunakan

Σd^2 = Jumlah dari Kuadrat Selisih Tiap Titik

$(\Sigma d)^2$ = Kuadrat dari Jumlah Selisih Tiap Titik

2.6

Desain Kekuatan Jaring

Strength of figure adalah kekuatan dari bentuk kerangka yang digunakan untuk menentukan kekuatan kerangka dari jaring geodesi menggunakan gambar, di mana kekuatannya akan setara dengan kerangka yang akan dibuat di lapangan. Nilai *Strength of figure* dipengaruhi oleh penentuan posisi dan jumlah GCP yang digunakan, di mana hal ini akan menentukan ketelitian kerangka tersebut. Kekuatan geometrik dicerminkan dengan harga *strength of figure* yang paling kecil, hal ini akan menjamin ketelitian yang merata pada seluruh jaringan. Sehingga dapat dipilih bentuk geometri yang baik (kuat dan kesalahan minimum). Cara yang digunakan untuk mengetahui kekuatan jaring tersebut adalah dengan mencari salah satu kemungkinan yang didapat dengan metode kuadrat terkecil (*least square*).

Pada hitung perataan kuadrat terkecil metode parameter, persamaan pengamatan suatu vektor *baseline* yang lepas dapat dituliskan dalam bentuk persamaan vektor sebagai berikut (Abidin, 2002):

$$V + B = X_B + X_A \quad (2.17)$$

Di mana B adalah data ukuran vektor *baseline* yang merupakan hasil dari perhitungan *baseline* dan merupakan parameter yang dicari. Dalam formulasi matriks dapat ditulis juga sebagai berikut:

$$V = [-11] \cdot \begin{bmatrix} X_B \\ X_A \end{bmatrix} - B \quad (2.18)$$

I merupakan matriks identitas berdimensi (3×3) , dan dapat diuraikan kembali dalam formulasi berikut:

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \\ X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} dX_{AB} \\ dY_{AB} \\ dZ_{AB} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Adapun formulasi umum yang digunakan persamaan pengamatan dari hitung perataan parameter:

$$V = AX - L \quad (2.20)$$

Di mana V adalah vektor residu, A adalah matriks desain, X adalah vektor parameter, dan L adalah vektor pengamatan. Sedangkan untuk suatu vektor *baseline* yang terikat, di mana salah satu titik ujungnya merupakan titik kontrol dan X_A sudah diketahui harganya, maka persamaan pengamatannya menjadi seperti berikut:

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_A + dX_{AB} \\ Y_A + dY_{AB} \\ Z_A + dZ_{AB} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Adapun solusi kuadrat terkecil untuk koordinat titik-titik dalam jaringan adalah:

$$\begin{aligned} X &= [A^T P A]^{-1} \cdot A^T P F \\ P &= Q_L^{-1} = \sigma^2 \cdot C_L^{-1} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Di mana

P = matriks berat dari pengamatan

Q_L = matriks kofaktor pengamatan

σ^2 = faktor variansi apriori

Q_L = matriks variansi kovariansi (VCV) pengamatan

Geometri dari suatu jaringan dapat di karakterisir dengan beberapa parameter, seperti jumlah dan lokasi titik dalam jaringan (termasuk titik tetap), jumlah *baseline* dalam jaringan (termasuk *common baseline*), konfigurasi *baseline* dan *loop*, serta konektivitas titik dalam jaringan (Abidin, 2002). Kekuatan geometri jaringan akan sangat tergantung pada karakteristik yang diadopsi dari parameter-parameter tersebut. Sehingga kekuatan jaring diformulasikan sebagai berikut:

$$SOF = \frac{trace(A^T \cdot A)^{-1}}{u} \quad (2.23)$$

Rumus di atas merupakan rumus untuk menghitung kekuatan jaring, dengan matriks desain (A) dan ukuran lebih (u) yang diperoleh dari jumlah ukuran dikurangi jumlah parameter (Anjasmara, 2005).

2.7

Candi Singosari

2.7.1 **Nama**

Candi Singosari sekitar awal abad 19 (tahun 1800 – 1850) disebut oleh orang Belanda dengan nama Candi Menara. Mungkin karena bentuknya yang seperti menara. Seorang ahli purbakala bangsa Eropa lainnya bernama W.F. Stutteirheim, pernah memberi nama candi ini dengan sebutan “Candi Cella” sebagai ganti dari nama Candi Menara. Alasannya karena candi tersebut mempunyai celah sebanyak empat buah pada dinding – dinding di bagian tubuh candinya. Tetapi nama tersebut tidak banyak yang memakainya. Juga menurut laporan dari W. Van Schmid yang mengunjungi candi ini pada tahun 1856, penduduk menamakan “Candi Cangkup”. Akhirnya nama yang hingga sekarang dipakai adalah “Candi Singosari”, karena letaknya di Singosari (Suwardono, 2001).

2.7.2 **Riwayat Penemuan**

Orang yang pertama kali membuat laporan kepurbakalaan tentang Candi Singosari adalah Nicolaus Engelhard, seorang Belanda yang mulai menjabat sebagai Gubernur Pantai Timur Laut Jawa (*Gouverneur van Jawa's Noord-Oost-Kust*) pada tahun 1801 dan berkedudukan di Pasuruan. Ia melaporkan adanya reruntuhan bangunan candi di daerah dataran tandus Malang dalam tahun 1803 (Suwardono, 2001).

Sejak saat itu, Candi Singosari mendapat perhatian dari orang Eropa lainnya. Mereka yang

pernah berkunjung dan membuat catatan laporannya adalah:

1. Thomas Stamfors Raffles tahun 1815
2. H.J. Domis tahun 1829 dan tahun 1836
3. Jonathan Rigg tahun 1847
4. R. Veerbeek tahun 1891
5. De Bruyn, Rouffaer dan para ahli sejarah dan purbakala lainnya.

2.7.3 Riwayat Perawatan

Pada tahun 1901 dan 1904 Komisi Arkeologi Belanda mengadakan penyelidikan. Pada tahun 1934 Departemen Survei Arkeologi dari Hindia Timur Belanda mengadakan pembinaan kembali (restorasi) bangunan Candi Singosari. Pekerjaan ini selesai pada tahun 1937. Tahun penyelesaian pekerjaan digoreskan pada batu kaki candi di sudut Barat Daya (Suwardono, 2001).

Menurut laporan tertulis dari para pengunjung Candi Singosari dari tahun 1803 sampai 1939, dikatakan bahwa Candi Singosari merupakan kompleks percandian yang luas. Di dalam kompleks tersebut didapatkan 7 buah bangunan candi yang sudah runtuh dan banyak arca berserakan di sana – sini. Salah satu dari tujuh candi yang dapat diselamatkan dari kemusnahan adalah candi yang sekarang kita sebut Candi Singosari ini. Begitu pula arca – arcanya, banyak yang dibawa ke Belanda. Arca yang terdapat di halaman Candi Singosari sekarang berasal dari candi – candi yang sudah musnah itu.

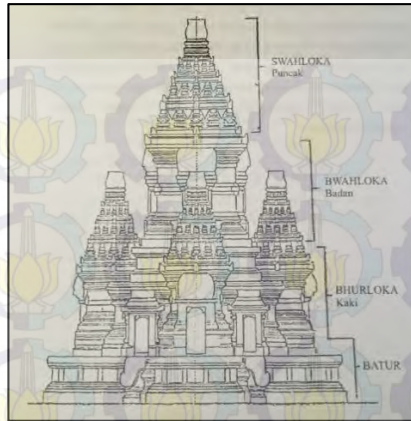


Gambar 2.10 Ukiran yang Menandakan Tahun Penyelesaian Rekonstruksi

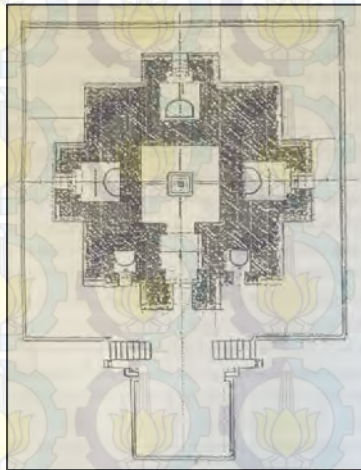
2.7.4 Uraian Bangunan

Menurut Suwardono (2001) Candi Singosari dibuat dari batu andesit. Bagian – bagian candi dari bawah ke atas sebagai berikut:

1. Sebuah tingkat bawah persegi empat yang disebut batur candi atau teras.
2. Bhurloka atau kaki candi yang tinggi dan sekaligus menjadi ruangan tempat arca – arca.
3. Bwahloka atau tubuh candi yang langsing dengan empat relung di nasing – masing sisinya.
4. Swahloka atau puncak candi yang menjulang dan makin ke atas semakin runcing.



Gambar 2.11 Candi Singosari Hasil Rekonstruksi
H.L. Leydie Melville



Gambar 2.12 Denah Bangunan Candi Singosari
oleh H.L. Leydie Melville

2.7.5 Fungsi Candi Singosari

Banyak yang menganggap bahwa Candi Singosari merupakan makam raja Kertanegara,

yaitu raja terakhir kerajaan Singosari. Di dalam candi terdapat sumuran tempat peletakan Garbhapatra, yaitu sebuah benjana persegi dari batu yang berisi bermacam benda dari logam, batu, biji – bijian, serta tanah.

Pada Candi Singosari tidak ditemukan sumuran tempat menyimpan Garbhapatra. Hal ini menunjukkan bahwa fungsi Candi Singosari lebih sesuai sebagai tempat pemujaan. Pemujaan tersebut ditunjukkan kepada Dewa Siwa, karena sistem mandala yang terlihat pada Candi Singosari berdasarkan arca – arcanya adalah Candi Hindu (Suwardono, 2001).



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian adalah Candi Singosari yang berlokasi pada koordinat $07^{\circ}53'15''$ LS dan $112^{\circ}39'49''$ BT. Candi ini dipilih sebagai objek pemodelan karena candi ini merupakan peninggalan bersejarah yang memiliki nilai budaya dan sejarah yang tinggi di daerah Jawa Timur.



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian: Candi Singosari
Sumber: (<http://upload.wikimedia.org>)

3.2 Data dan Peralatan

3.2.1 Data

Data yang digunakan dalam tugas akhir ini antara lain:

- Foto – foto candi yang digunakan sebagai objek dalam penelitian.
- Data *3D point clouds* candi yang didapatkan dari pengukuran lapangan menggunakan *terrestrial laser scanner*.
- Data ukuran koordinat (X, Y, Z) GCP dan ICP pada candi
- Data ukuran kerangka kontrol

3.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam tugas akhir ini antara lain terbagi dalam kelompok *hardware* (perangkat keras) dan *software* (perangkat lunak) yaitu sebagai berikut:

1. *Hardware*

- *Terrestrial Laser Scanner* GeoMax Zoom 300
- *Total station* Topcon GTS-235 beserta kelengkapan dan aksesoris untuk pengukuran koordinat titik kontrol
- 2 set *Receiver* GPS Geodetik Topcon untuk pengukuran kerangka kontrol
- Kamera Canon EOS 60D
- *Personal Computer* (PC) dengan spesifikasi *processor* intel i7 4770K, VGA NVIDIA GTX 780, RAM 16 GB sebagai alat pengolahan data

2. *Software*

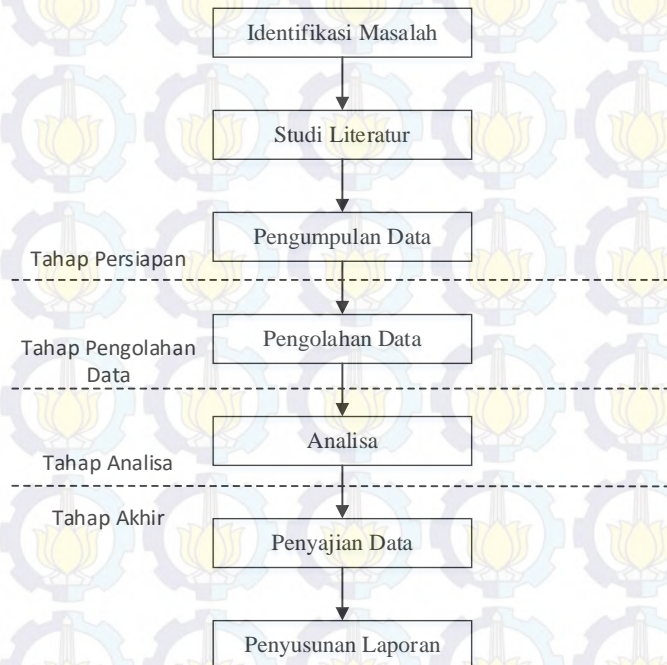
- Sistem operasi Windows 10 Professional

- *Software* pengolahan *SfM*
- X-PAD Office MPS sebagai software pengolahan data *TLS*
- Autodesk ReCap 2016 untuk penyajian data *point clouds*
- Microsoft Office 2016 untuk penyajian dan pembuatan laporan hasil penelitian

3.3

Metodologi Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:



Gambar 3.2 Diagram Alir Tahapan Penelitian

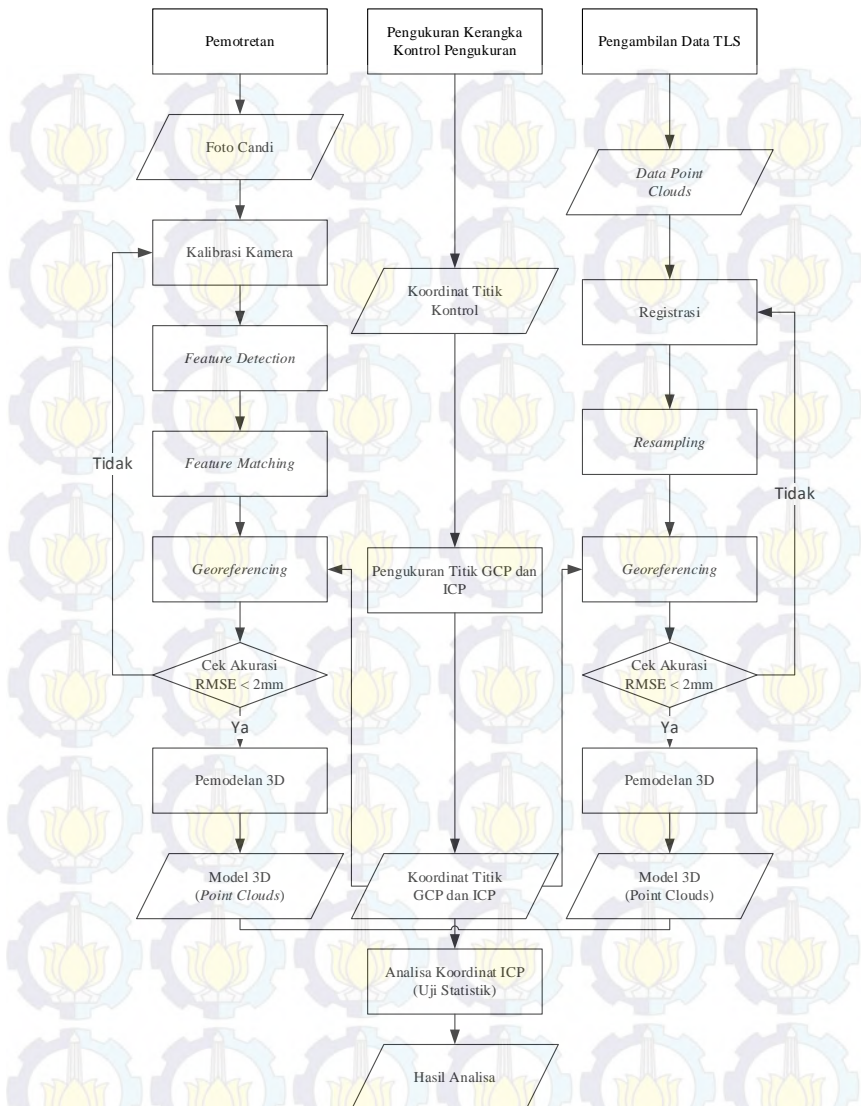
3.3.1 Tahap Persiapan

Pada tahap ini kegiatan yang telah dilakukan adalah:

1. Identifikasi Masalah
Identifikasi masalah dilakukan untuk menentukan dan membatasi fokus permasalahan yang akan diselesaikan dalam penelitian.
2. Studi Literatur
Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan pemahaman mengenai materi yang terkait dengan penelitian ini. Dalam hal ini adalah pemodelan 3D dengan metode *SfM* dan *TLS*.
3. Persiapan Peralatan dan Perizinan Lokasi
Pada kegiatan ini dilakukan persiapan peralatan, baik *hardware* maupun *software* yang digunakan. Selain itu, Candi Singosari merupakan peninggalan bersejarah yang dijadikan objek wisata, maka untuk melakukan pengumpulan data perlu dilakukan proses perizinan melalui Badan Pelestarian Cagar Budaya (BPCB) Mojokerto.
4. Pengumpulan Data
Tahap ini dilakukan untuk pengambilan data lapangan yang akan digunakan dalam penelitian.

3.3.2 Tahap Pengolahan Data

Tahap pengolahan data dalam penelitian ini ditunjukkan dalam diagram berikut:



Gambar 3.3 Diagram Alir Tahap Pengolahan Data

Adapun penjelasan dari diagram alir tersebut adalah sebagai berikut:

1. Hal pertama yang dilakukan adalah membuat kerangka kontrol yang terdiri dari 4 buah titik kontrol. Kerangka ini digunakan dalam pengukuran GCP dan ICP pada objek. Perhitungan koordinat X dan Y dilakukan menggunakan sistem koordinat UTM yang didapatkan melalui pengukuran menggunakan GPS Geodetik, sedangkan koordinat Z menggunakan koordinat lokal. Hasil pengukuran ini berupa koordinat GCP dan ICP objek yang digunakan dalam proses *georeferencing* dan analisa hasil.
2. Pemotretan Candi Singosari dilakukan menggunakan kamera non-metrik secara bebas. Foto yang diambil diusahakan bertampalan sekitar 60 – 70% agar model 3D yang didapat mampu merepresentasikan bentuk yang sesungguhnya.
3. Foto yang telah diambil kemudian diolah menggunakan *software* pengolahan *SfM*. Kalibrasi, *feature extraction*, *feature matching*, pemodelan, pembuatan *point clouds* dilakukan menggunakan *software* ini. Algoritma yang digunakan dalam proses ini adalah *Scale Invariant Feature Transform (SIFT)*.
4. Pengukuran menggunakan TLS dilakukan untuk mendapatkan data *point clouds*. *Scan* dilakukan sebanyak 4 kali dengan posisi yang berbeda.
5. Data *point clouds* yang didapat melalui TLS diolah menggunakan *software* X-PAD Office MPS. Proses registrasi, *filtering*, *resampling*

dan *georeferencing* dilakukan menggunakan software ini. Hasil akhir dari pengolahan data TLS adalah data point clouds dalam format .pts.

6. Setelah diperoleh data *point clouds* dari hasil *SfM* dan TLS dengan sistem koordinat yang sama, koordinat ICP dari kedua data akan di analisa.

3.3.3 Tahap Analisa

Pada tahap ini akan dilakukan uji statistik terhadap perbedaan nilai ICP dari kedua model terhadap nilai ICP yang didapat menggunakan *total station*.

3.3.4 Tahap Penyajian Data

Pada tahap ini akan dilakukan proses penyajian data. Hasil dari analisa perbandingan nilai ICP akan ditunjukkan dalam bentuk tabel. Model 3D juga akan disajikan. Tahap ini juga akan dilakukan proses penarikan kesimpulan berdasarkan analisa. Hasil dari penafsiran data dan penarikan kesimpulan akan disusun dalam bentuk laporan tertulis untuk memberikan tambahan ilmu baik secara praktis maupun secara teoritis untuk penelitian selanjutnya.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1

Hasil

4.1.1 Perhitungan Poligon

Kerangka kontrol pada penelitian ini terdiri dari 4 titik. Kerangka kontrol ini digunakan dalam pengukuran *GCP* dan *ICP* objek. Alat yang digunakan dalam pengukuran kerangka kontrol adalah *Total Station*. Data yang diambil dalam pengukuran adalah sudut horizontal, sudut zenith, dan jarak miring, berikut adalah hasilnya:

Tabel 4.1 Koordinat Titik Kontrol

Nama	X	Y	Z
P1	683407.304	9127736.867	10.000
P2	683434.028	9127720.883	9.884
P3	683451.013	9127749.105	10.159
P4	683427.318	9127765.215	10.133

Hasil perhitungan dari kerangka kontrol ini memiliki nilai kesalahan penutup sudut sebesar 8 detik dan kesalahan penutup tinggi sebesar 3,288 milimeter.

4.1.2 Perhitungan GCP dan ICP

Sama halnya dengan pengukuran kerangka kontrol, alat yang digunakan dalam pengukuran *groud control point (GCP)* dan *independent check point (ICP)* adalah *Total Station* dan data yang diambil adalah sudut horizontal, sudut zenith, dan jarak miring. Untuk titik yang tidak bisa dijangkau prisma, sudut horizontalnya dicatat dan koordinat (X dan Y) akan didapatkan melalui pengikatan ke

muka, sedangkan elevasi didapatkan melalui perhitungan tinggi bangunan.

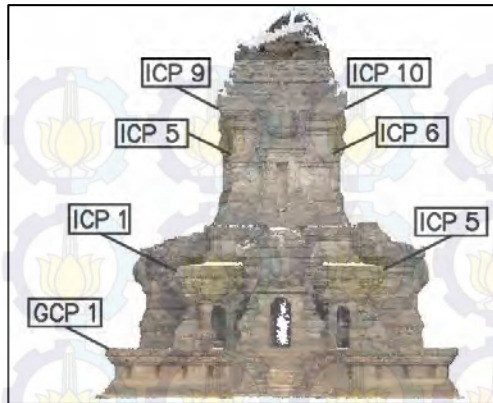
3 buah *GCP* akan digunakan dalam proses *georeferencing*, sedangkan 12 *ICP* akan digunakan sebagai titik pembanding dalam proses uji statistik yang letaknya dapat dilihat pada gambar 4.1 dan 4.2. Berikut adalah hasil perhitungannya:

Tabel 4.2 Koordinat GCP

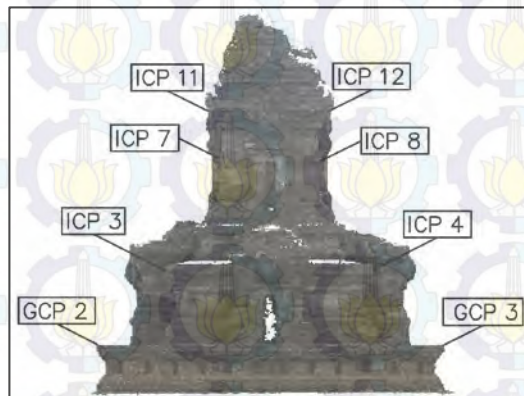
Nama	X	Y	Z
GCP 1	683430.474	9127752.311	12.028
GCP 2	683435.109	9127733.264	12.026
GCP 3	683442.330	9127745.174	12.034

Tabel 4.3 Koordinat ICP

Nama	X	Y	Z
ICP 1	683431.391	9127748.566	15.128
ICP 2	683427.015	9127741.475	15.094
ICP 3	683434.156	9127737.082	15.107
ICP 4	683438.562	9127744.188	15.106
ICP 5	683432.120	9127745.622	19.712
ICP 6	683429.948	9127742.176	19.701
ICP 7	683433.454	9127740.040	19.710
ICP 8	683435.587	9127743.496	19.708
ICP 9	683431.979	9127746.294	21.671
ICP 10	683429.351	9127742.019	21.679
ICP 11	683433.576	9127739.396	21.677
ICP 12	683436.221	9127743.644	21.672



Gambar 4.1 Letak GCP dan ICP pada tampak depan Candi

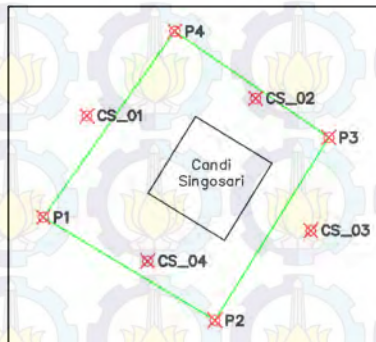


Gambar 4.2 Letak GCP dan ICP pada tampak belakang Candi

Untuk mengetahui bahwa persebaran GCP dan ICP sudah baik, maka dilakukan perhitungan *strength of figure*. Nilai 0.247 diperoleh dari perhitungan kekuatan jaring. Nilai yang kecil ini menandakan bahwa persebaran GCP dan ICP bisa dikatakan baik.

4.1.3 Perencanaan TLS

Proses pengambilan data menggunakan *terrestrial laser scanner* dilakukan sebanyak 4 kali, yang lokasinya ditandai dengan CS_01 sampai CS_04. Sedangkan garis hijau merupakan garis poligon. Perencanaan dibuat seperti ini agar tekstur candi bisa didapat dengan baik. Sketsa tempat berdiri alat TLS dapat dilihat pada gambar 4.3.



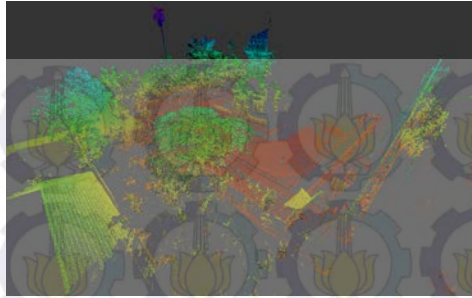
Gambar 4.3 Perencanaan Posisi *Laser Scanner*

Keterangan:

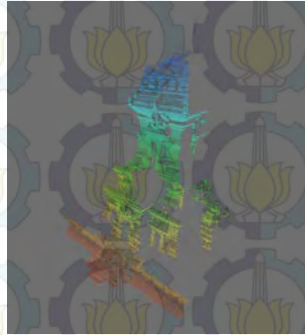
1. CS_01 – CS_04 : lokasi *scan TLS*
2. P1 – P4 : Titik kontrol poligon

4.1.4 Filtering

Proses *filtering* bertujuan untuk membuang titik yang tidak diperlukan dari *point clouds*. Proses ini dilakukan secara manual, berikut adalah contoh sebelum dan sesudah proses *filtering* untuk data CS_01:



Gambar 4.4 CS_01 Sebelum Proses *Filtering*



Gambar 4.5 Data CS_01 Setelah Proses *Filtering*

Jumlah titik dalam point clouds CS_01 mengalami penurunan hingga 90%, yaitu dari 5.599.525 menjadi hanya 537.727 titik.

4.1.5 Data TLS

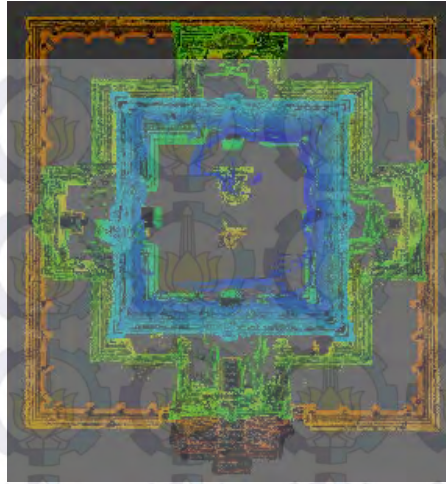
Proses registrasi yang digunakan untuk menyatukan 4 buah *point clouds* yang didapat dari pengambilan data TLS adalah *cloud to cloud registration*. Berikut adalah tampilan data yang sudah berada dalam sistem koordinat yang sama:



Gambar 4.6 Tampak Depan Data TLS



Gambar 4.7 Tampak Samping Data TLS



Gambar 4.8 Tampak Atas Data TLS

4.1.6 Kalibrasi Kamera

Dalam metode SfM, proses kalibrasi kamera dilakukan bersamaan dengan proses *feature detection* dan *feature matching*. Parameter internal kamera (IOP) yang didapat dari proses kalibrasi dapat dilihat pada tabel 4.4:

Tabel 4.4 Hasil Kalibrasi Kamera

IOP	Nilai
f	18.9869
X_0	-0.2242 mm
Y_0	-0.2045 mm
K_1	0.000533
K_2	-0.00000114
K_3	-0.00000000113
P_1	0.0000213
P_2	0.0000101

4.1.7 *Feature Detection*

Pada proses ini, titik di deteksi pada setiap foto yang dianggap stabil dalam berbagai sudut pandang dan pencahayaan, kemudian menghasilkan *descriptor* untuk setiap titik ini berdasarkan *local neighborhood*. Berikut adalah jumlah *feature point* yang terdeteksi pada foto:

Tabel 4.5 Hasil *Feature Detection*

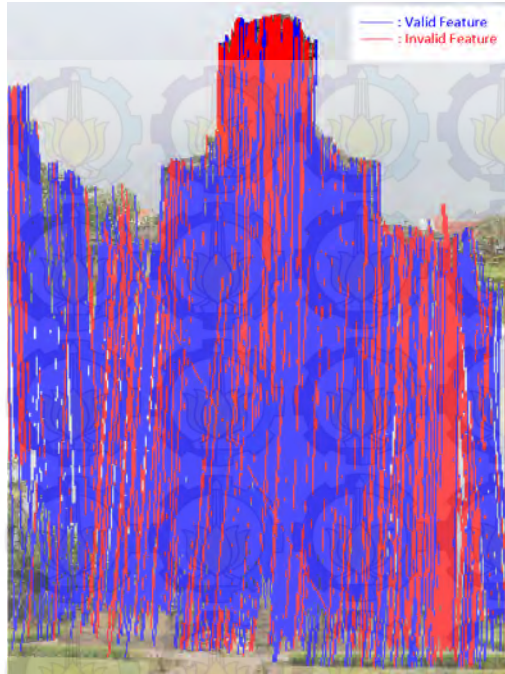
Nama	<i>Feature Points</i>
Foto 1	2885
Foto 2	3018
Foto 3	3188
Foto 4	3223
Foto 5	3181

4.1.8 *Feature Matching*

Setelah fitur pada setiap foto dideteksi, *descriptor* dalam fitur akan digunakan untuk menentukan korespondensi antara 1 foto dengan yang lainnya dengan menggunakan algoritma *SIFT*. Berikut adalah contoh *feature matching* antara Foto 1 dan Foto 2:



Gambar 4.9 Foto 1 (kiri) dan Foto 2 (Kanan)

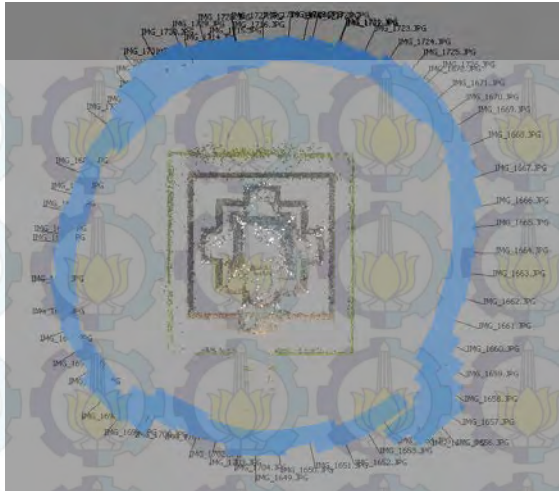


Gambar 4.10 *Feature Matching* antara Foto 1 dengan Foto 2

Feature antara kedua foto tersebut berjumlah 3.037 titik. Gambar 4.10 menunjukkan hasil dari proses *feature matching* dengan hasil 2.190 titik yang valid, atau sebesar 72% dari total fitur. Garis merah menandakan fitur yang tidak cocok (invalid), sedangkan garis biru menandakan fitur yang cocok (valid).

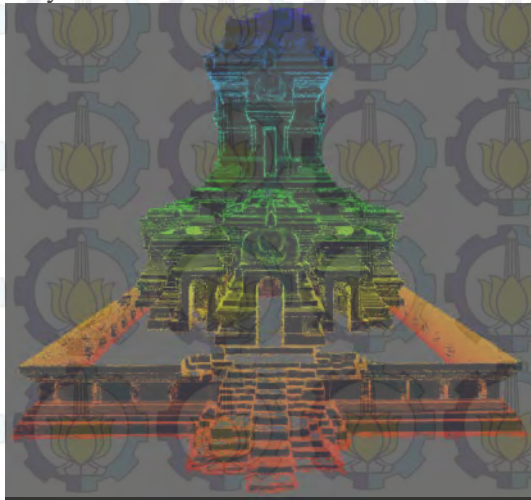
4.1.9 Data SfM

64 buah foto objek yang telah diolah menggunakan *software* pengolahan SfM. Berikut adalah posisi dari pengambilan foto:

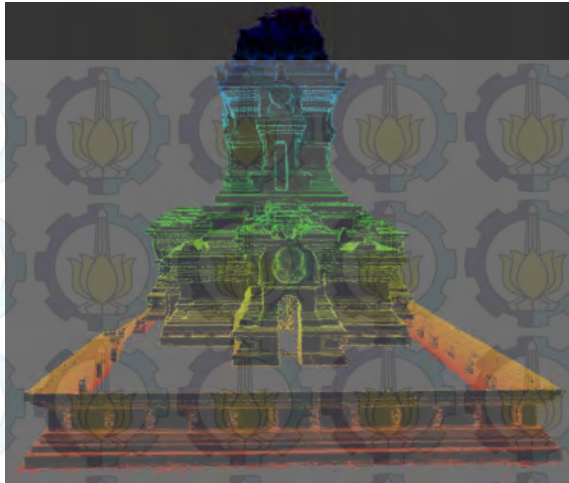


Gambar 4.11 Posisi Pengambilan Foto

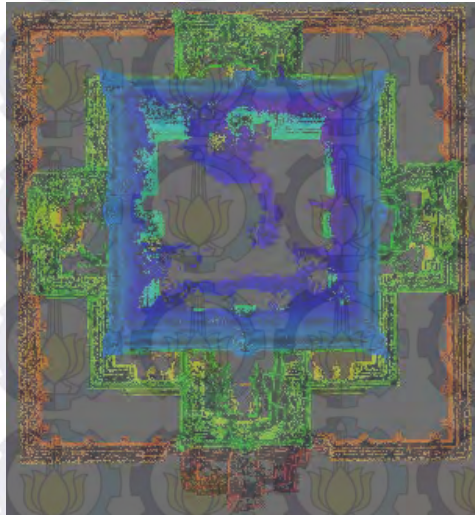
Data *point cloud* di *extract* dari Model 3D yang didapat melalui proses SfM, berikut adalah hasilnya:



Gambar 4.12 Tampak Depan Data *SfM*



Gambar 4.13 Tampak Sampling Data *SfM*



Gambar 4.14 Tampak Atas Data *SfM*

4.1.10 Georeference

Proses *georeference* dilakukan untuk mengubah koordinat lokal tiap point clouds ke dalam satu sistem koordinat global (UTM). 3 buah *GCP* digunakan dalam proses ini. Matrix yang digunakan dapat dilihat pada persamaan 4.1

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Di mana:

1. R_{xx} : Parameter Rotasi
2. T_x, T_y, T_z : Parameter Translasi

$$\begin{bmatrix} -0.537 & 0.847 & -0.001 & 15.687 \\ -0.846 & -0.537 & 0.010 & 53.299 \\ 0.008 & 0.06 & 1.002 & 11.947 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\begin{bmatrix} -1.213 & 1.938 & 0.002 & 32.641 \\ -1.938 & -1.213 & -0.002 & 35.163 \\ -0.001 & -0.003 & 2.286 & 9.595 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Persamaan 4.2 merupakan matrix transformasi untuk point clouds TLS, sedangkan persamaan 4.3 merupakan matrix transformasi untuk point clouds SfM.

4.1.11 Koordinat ICP data SfM dan TLS

Nilai ICP diambil dari kedua *point clouds* untuk digunakan dalam analisa menggunakan uji statistik. Nilai koordinat dari tiap ICP dapat dilihat pada tabel 4.6 dan 4.7.

Tabel 4.6 Koordinat ICP TLS

Nama	X	Y	Z
ICP 1	683431.392	9127748.564	15.131
ICP 2	683427.016	9127741.473	15.100
ICP 3	683434.168	9127737.075	15.102
ICP 4	683438.560	9127744.188	15.116
ICP 5	683432.118	9127745.612	19.713
ICP 6	683429.947	9127742.174	19.758
ICP 7	683433.457	9127740.039	19.708
ICP 8	683435.589	9127743.499	19.702
ICP 9	683431.968	9127746.292	21.677
ICP 10	683429.353	9127742.018	21.676
ICP 11	683433.578	9127739.395	21.678
ICP 12	683436.223	9127743.644	21.670

Tabel 4.7 Koordinat ICP *SfM*

Nama	X	Y	Z
ICP 1	683431.390	9127748.567	15.132
ICP 2	683427.010	9127741.473	15.106
ICP 3	683434.153	9127737.084	15.110
ICP 4	683438.560	9127744.190	15.107
ICP 5	683432.121	9127745.624	19.706
ICP 6	683429.945	9127742.175	19.704
ICP 7	683433.455	9127740.038	19.694
ICP 8	683435.585	9127743.507	19.705
ICP 9	683431.973	9127746.297	21.664
ICP 10	683429.349	9127742.021	21.669
ICP 11	683433.576	9127739.405	21.669
ICP 12	683436.222	9127743.647	21.668

4.2 Analisa

4.2.1 Analisa Kerangka Kontrol

Kerangka kontrol hasil pengukuran di analisa terhadap 3 kriteria, yaitu kesalahan linier, kesalahan penutup sudut, dan kesalahan penutup tinggi.

Tabel 4.8 Kesalahan Kerangka Kontrol

No.	Nama	Nilai
1	Kesalahan Linier	0.00014
2	Kesalahan Penutup Sudut	8"
3	Kesalah Penutup Tinggi	3.288 mm

Nilai 0.00014 di dapat dari persamaan kesalahan linier. Nilai ini lebih kecil dari standar minimal yaitu 1/2500 atau 0,0004, oleh karena itu nilai linear memasuki nilai ketelitian.

Nilai 10 detik didapat dari persamaan kesalahan penutup sudut, di mana nilai ini lebih besar dari kesalahan penutup sudut milik kerangka kontrol, yaitu 8 detik. Dengan ini nilai kesalahan penutup sudut memasuki nilai ketelitian.

3.570 mm nilai maksimal dari kesalahan penutup tinggi. Kerangka kontrol memiliki nilai kesalahan penutup tinggi sebesar 3,288 mm sehingga kesalahan penutup tinggi memasuki nilai ketelitian.

4.2.2 Analisa Proses TLS

a. Analisa Registrasi

Registrasi dilakukan menggunakan metode *cloud to cloud registration* dengan menggunakan data CS_01 sebagai referensinya.

Tabel 4.9 Nilai *RMS Error* Registrasi

Reference	Aligned	<i>RMS Error</i> (mm)
CS_01	CS_02	1.321
CS_02	CS_03	1.472
CS_03	CS_04	1.639

Pada tabel 4.9, 3 Nilai *RMS Error* yang dihasilkan dalam proses registrasi bernilai lebih kecil dari 2 mm, di mana 2 mm merupakan nilai kerapatan titik rata-rata dari *terrestrial laser scanner* yang digunakan.

Nilai *RMS* paling besar, yaitu 1.639 mm berada pada registrasi antara CS_03 dengan CS_04. Penyebab utama besarnya nilai *RMS* ini adalah tingkat *overlap* yang sangat kecil ketika pengambilan data. Seperti yang terlihat pada Gambar 4.15, *overlap* data hanya berada pada pojok bangunan saja. Hal ini menyebabkan minimnya titik yang bisa digunakan dalam proses registrasi.

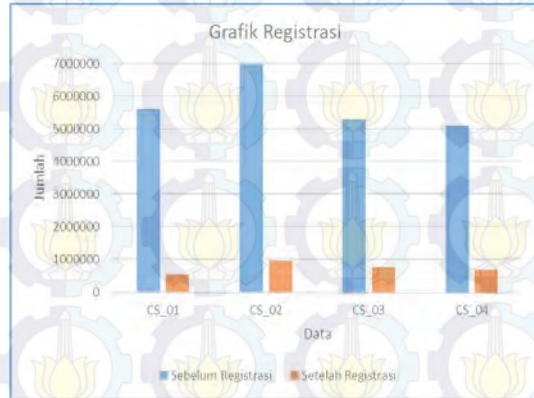


Gambar 4.15 Data CS_03 (Kiri) dan CS_04 (Kanan)

b. Analisa Filtering

Point Cloud yang dihasilkan proses registrasi berjumlah 22.983.498 titik dengan densitas sebesar 2mm. Filtering dilakukan untuk membuang titik yang tidak digunakan. Proses ini dilakukan secara manual dengan 2

parameter. Yang pertama adalah titik bukan merupakan bagian dari objek penelitian. Yang kedua adalah *noise* yang tidak seharusnya terdapat pada objek.



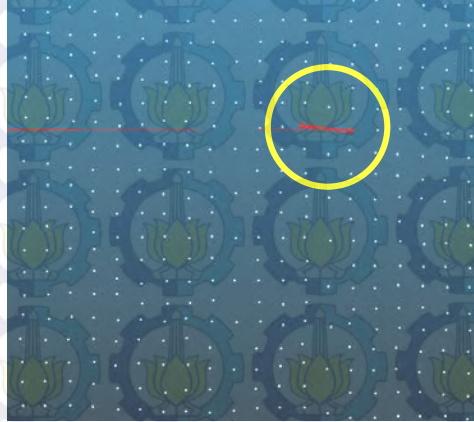
Gambar 4.16 Grafik Registrasi

Dapat dilihat pada Gambar 4.16, data CS_02 mengalami pengurangan jumlah titik yang paling besar, yaitu 6.005.562 titik. Hal ini disebabkan banyaknya objek pada lokasi *scan* data CS_02, yang salah satunya adalah pohon.

Setelah dilakukan proses filtering secara manual, jumlah titik pada Point Cloud ini mengalami pengurangan sebesar 87% menjadi 2.938.836 titik. Pengurangan jumlah titik sebesar ini akan meringankan proses pengolahan data selanjutnya.

c. Analisa Densitas *Point Clouds*

Terrestrial Laser Scanner yang digunakan, GeoMax Zoom 300 memiliki spesifikasi densitas titik sebesar 2 mm.



Gambar 4.17 Densitas titik data TLS

Seperti yang terlihat pada gambar 4.17, rata – rata jarak antar titik adalah 2 mm. Tetapi ada beberapa titik yang memiliki jarak sebesar 4 mm, seperti titik yang diberi tanda lingkaran pada gambar. Hal ini terjadi karena adanya gangguan ketika pengambilan data, seperti orang yang melintas ketika proses *scan*.

Dengan jarak rata – rata antara titik bernilai 2 mm, hal ini menandakan bahwa data yang dihasilkan sesuai dengan spesifikasi alat yang digunakan.

4.2.3 Analisa Proses *SfM*

Structure from Motion terdiri dari 3 proses, yaitu kalibrasi kamera, *feature detection* dan *feature matching*. Dalam *software* pengolahan *SfM*

yang digunakan, ketiga proses ini dirangkum menjadi satu proses, yaitu *photos alignment*.

Proses SfM menghasilkan point clouds yang jumlah titiknya sebanyak 5.621.703 dengan densitas sebesar 2 mm.

a. Analisa Kalibrasi Kamera

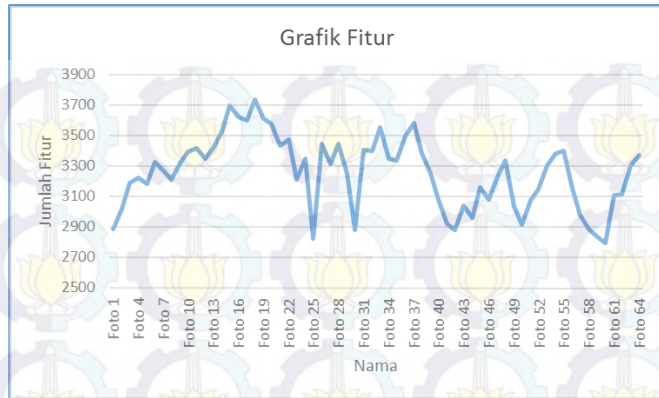
Kalibrasi kamera pada *software* pengolahan SfM yang digunakan merupakan kalibrasi dengan jenis *self-calibration*, di mana kalibrasi dilakukan secara langsung menggunakan objek penelitian.

Fokus kamera mengalami perubahan sebesar 0.987 mm, X_0 sebesar 0.224 mm dan Y_0 sebesar 0.205 mm. Ketiga nilai ini bisa dikatakan kecil melihat nilai perubahan tidak melebihi 1 mm.

Kekurangan dari *software* pengolahan SfM yang digunakan adalah tidak tersedianya parameter untuk menilai bagus tidaknya hasil kalibrasi kamera, sehingga kualitas dari parameter IOP yang dihasilkan tidak bisa di analisa dengan baik.

b. Analisa Feature Detection

Dari 64 foto yang digunakan, fitur paling banyak terdeteksi pada Foto 18 yaitu sebanyak 3.736 titik, sedangkan fitur paling sedikit terdapat pada Foto 60 sebanyak 2.791 titik.



Gambar 4.18 Grafik Fitur yang terdeteksi pada tiap foto

Perbedaan jumlah fitur terjadi karena adanya perbedaan jumlah objek pada foto. Semakin banyak objek pada foto, semakin banyak juga fitur yang bisa dibuat. Dapat dilihat pada Gambar 4.19, foto 18 dengan jumlah fitur terbanyak memiliki objek yang banyak, seperti pohon, rumah dan orang.



Gambar 4.19 Foto 18

c. Analisa Feature Matching

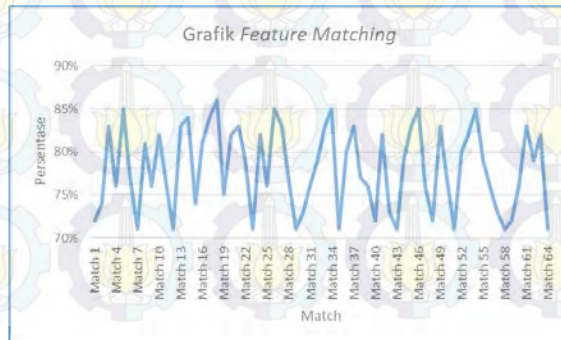
Pada proses *feature matching*, total fitur antara 2 foto bervariasi dengan total paling

banyak terdapat pada Foto 63 dengan Foto 64 sebesar 3102, sampai dengan hanya 1 total fitur seperti contohnya antara Foto 4 dengan Foto 45. Total fitur yang besar menandakan bahwa kedua foto memiliki nilai *overlap* yang besar, seperti pada contoh Foto 1 dan Foto 2.



Gambar 4.20 Foto 4 (Kiri) dan Foto 45 (Kanan)

Total fitur yang sedikit menandakan tingkat *overlap* yang kecil atau bahkan tidak *overlap*. Seperti yang terlihat pada Gambar 4.20, Foto 4 merupakan foto tampak depan dari candi, sedangkan Foto 45 merupakan tampak belakang dari candi. Oleh karena itu total fitur antara kedua foto ini hanya berjumlah 1.



Gambar 4.21 Grafik *Feature Matching*

Gambar 4.21 merupakan grafik persentase *feature matching* antara 2 foto yang bertampalan. *Match 1* adalah *feature matching* antara Foto 1 dengan 2, *Match 2* antara Foto 2 dengan 3, dan seterusnya.

Jumlah fitur yang valid dihitung persentasenya terhadap total fitur. Persentase *feature matching* paling tinggi berada pada *Match 18* (foto 18 dengan 19), yaitu 86%. Hal ini dikarenakan foto 18 memiliki jumlah fitur yang paling banyak.

4.2.4 Analisa Proses Georeference

Matrix transformasi yang digunakan dalam proses *georeference* memiliki nilai *RMS Error* yang dapat digunakan untuk melakukan analisa apakah proses ini sudah memenuhi nilai ketelitian atau belum.

Tabel 4.10 Nilai *RMS Error*

No.	Nama	<i>RMS Error</i> (mm)
1	<i>TLS</i>	1.588
2	<i>SfM</i>	1.344

Matrix transformasi milik *TLS* memiliki nilai *RMS Error* sebesar 1,588 milimeter dan 1,344 milimeter untuk *RMS Error* milik *SfM*. Kedua nilai *RMS Error* ini sudah memasuki kriteria, di mana nilai maksimal dari *RMS Error* sebesar 2 milimeter.

TLS memiliki nilai *RMS Error* yang lebih besar karena data *TLS* memiliki tingkat *overlap* yang kecil, sehingga titik pada posisi GCP hanya berjumlah sedikit. Sedangkan data *SfM* memiliki tingkat *overlap* yang tinggi, sehingga terdapat

banyak titik pada posisi GCP. Tingkat *overlap* ini menyebabkan RMS Error *SfM* memiliki nilai yang lebih baik dari *TLS*.

4.2.5 Analisa Koordinat ICP

Uji statistik dilakukan terhadap nilai ICP yang dihasilkan oleh kedua metode, dengan menggunakan nilai ICP yang didapat menggunakan *total station* sebagai pembandingnya. Uji statistik yang dilakukan adalah uji *t student*. Berdasarkan tabel distribusi *t student*, dengan menggunakan tingkat kepercayaan 90% dan derajat kebebasan sebesar 2, didapatkan nilai $t = 2,920$.

Tabel 4.11 Hasil Uji *t student* pada koordinat X

Nama	Min. Interval	Max. Interval	TLS	SfM
ICP1	683431.383	683431.407	683431.392	683431.390
ICP2	683427.007	683427.031	683427.016	683427.010
ICP3	683434.149	683434.172	683434.168	683434.153
ICP4	683438.554	683438.578	683438.560	683438.560
ICP5	683432.113	683432.136	683432.118	683432.121
ICP6	683429.941	683429.964	683429.947	683429.945
ICP7	683433.447	683433.470	683433.457	683433.455
ICP8	683435.580	683435.603	683435.589	683435.585
ICP9	683431.971	683431.995	683431.968	683431.973
ICP10	683429.344	683429.367	683429.353	683429.349
ICP11	683433.568	683433.592	683433.578	683433.576
ICP12	683436.214	683436.237	683436.223	683436.222

Tabel 4.12 Hasil Uji t student pada koordinat Y

Nama	Min. Interval	Max. Interval	TLS	SFM
ICP1	9127748.550	9127748.582	9127748.564	9127748.567
ICP2	9127741.459	9127741.491	9127741.473	9127741.473
ICP3	9127737.066	9127737.098	9127737.075	9127737.084
ICP4	9127744.172	9127744.204	9127744.188	9127744.190
ICP5	9127745.606	9127745.638	9127745.612	9127745.624
ICP6	9127742.160	9127742.192	9127742.174	9127742.175
ICP7	9127740.024	9127740.056	9127740.039	9127740.038
ICP8	9127743.480	9127743.512	9127743.499	9127743.507
ICP9	9127746.278	9127746.310	9127746.292	9127746.297
ICP10	9127742.003	9127742.035	9127742.018	9127742.021
ICP11	9127739.380	9127739.412	9127739.395	9127739.405
ICP12	9127743.628	9127743.660	9127743.644	9127743.647

Tabel 4.13 Hasil Uji t student pada koordinat Z

Nama	Min. Interval	Max. Interval	TLS	SFM
ICP1	15.110	15.145	15.131	15.132
ICP2	15.076	15.111	15.100	15.106
ICP3	15.089	15.124	15.102	15.110
ICP4	15.089	15.124	15.116	15.107
ICP5	19.695	19.730	19.713	19.706
ICP6	19.683	19.718	19.758	19.704
ICP7	19.693	19.727	19.708	19.694
ICP8	19.691	19.726	19.702	19.705
ICP9	21.654	21.689	21.677	21.664
ICP10	21.662	21.697	21.676	21.669
ICP11	21.660	21.695	21.678	21.669
ICP12	21.655	21.690	21.670	21.668

Berdasarkan tabel 4.11, 4.12 dan 4.13 di atas terlihat bahwa sebagian besar nilai koordinat ICP berada di antara interval kepercayaan. Beberapa nilai yang berada di luar interval ditandai dengan warna merah (contoh: 9127745.612). Pada sumbu X dan Y, terdapat 2 koordinat yang ditolak untuk kedua metode. Untuk sumbu Z hanya 1 koordinat TLS yang ditolak, sedangkan terdapat 2 koordinat SFM ditolak.

Tabel 4.14 Hasil Analisa ICP

No.	Nama	ICP diterima	Persentase
1	TLS	31	86%
2	SFM	30	83%

Secara keseluruhan, terdapat 31 titik TLS yang diterima atau sebesar 86%, sedangkan untuk SFM sebanyak 30 titik atau 83%. Hal ini menandakan kedua metode memiliki hasil yang baik, di mana kedua metode memberikan hasil di atas 80%. Berdasarkan hasil analisa terlihat bahwa tidak ada perbedaan yang cukup berarti/signifikan antara kedua metode ini.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

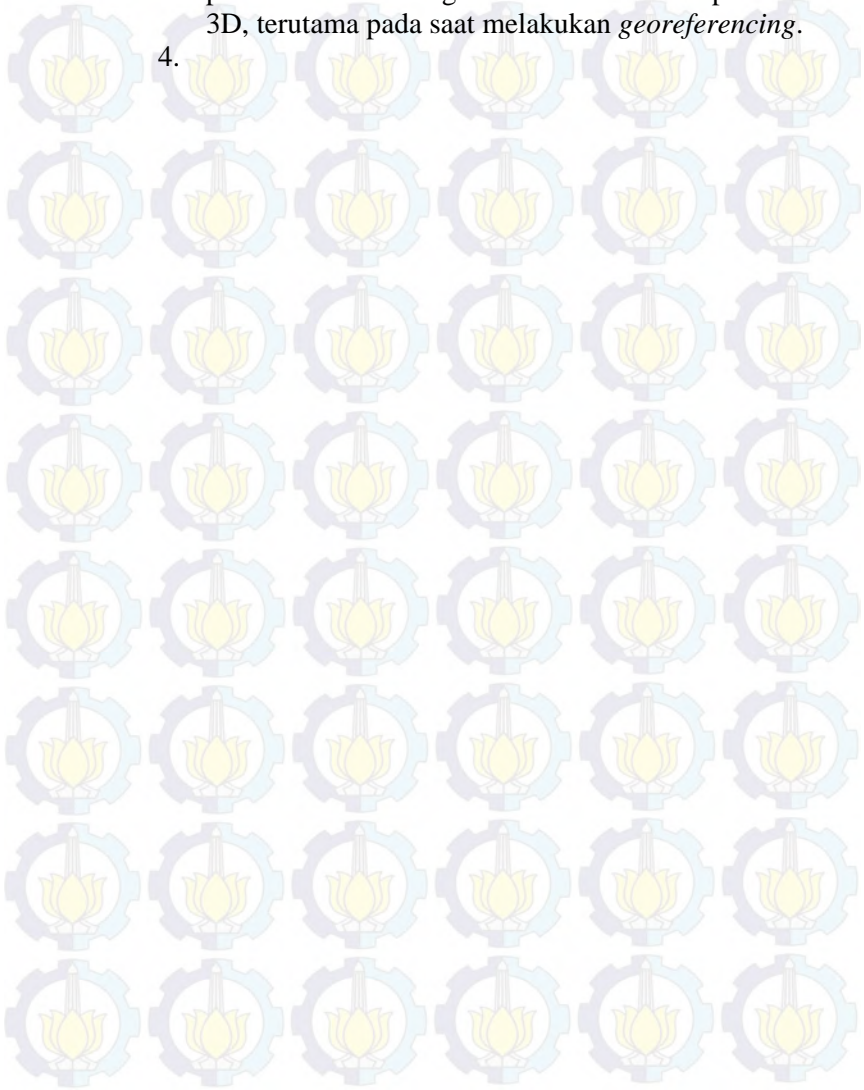
1. Visualisasi model 3D dari Candi Singosari menggunakan metode *Terrestrial Laser Scanning* dan *Structure from Motion* berhasil dilakukan. Model 3D yang dihasilkan berbentuk *point clouds* dengan densitas 2 mm. Model 3D hasil *Terrestrial Laser Scanning* memiliki titik sebanyak 2.938.836 titik, sedangkan hasil *Structure from Motion* sebanyak 5.621.703 titik atau 91% lebih banyak dari *point clouds* yang dihasilkan *Terrestrial Laser Scanning*.
2. Hasil uji statistik terhadap kedua model dengan data *Total Station* memberikan hasil yang baik. Terdapat 31 titik TLS yang diterima atau sebesar 86%, sedangkan untuk SFM sebanyak 30 titik atau 83%. Hal ini menandakan kedua metode memiliki hasil yang baik, di mana kedua metode memberikan hasil di atas 80%. Metode *Terrestrial Laser Scanning* memberikan akurasi yang lebih baik dari metode *Structure from Motion*, tetapi berdasarkan hasil analisa terlihat bahwa tidak ada perbedaan yang cukup berarti/signifikan antara kedua metode ini.

5.2 Saran

1. Untuk penelitian selanjutnya, pengambilan data menggunakan *Terrestrial Laser Scanner* sebaiknya menggunakan tingkat *overlap* yang tinggi, sehingga hasil yang lebih baik dapat diperoleh dari proses registrasi dan *georeferencing*.
2. Kalibrasi kamera sebaiknya dilakukan sebelum proses *Structure from Motion (pre-calibration)*, agar analisa terhadap parameter kalibrasi kamera dapat dilakukan dengan baik.

3. Pemasangan tanda atau titik kontrol pada objek penelitian akan sangat membantu dalam pemodelan 3D, terutama pada saat melakukan *georeferencing*.

- 4.



DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z. (2002). *Survey Dengan GPS*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Adhitiaputra, R. (2013). Mekanisme Kalibrasi Terrestrial Laser Scanner (TLS). *Undergraduate Thesis, Bandung: Departement of Geodetic Engineering, Institut Teknologi Bandung*.
- Anjasmara, I. M. (2005). *Sistem Tinggi*. Surabaya: Pendidikan dan Pelatihan (DIKLAT) Teknis Pengukuran dan Pemetaan Kota.
- Atkinson, K. B. (1996). *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Scotland: Whittles Publishing.
- Barnes, A. (2012). Penggunaan Metode Fotogrametri Rentang Dekat dan Laser Scanning dalam Pembuatan Dense Point Cloud (Studi Kasus: Candi Cangkuang). *Undergraduate Thesis, Bandung: Departement of Geodetic Engineering, Institut Teknologi Bandung*.
- Chow, J., Lichti, D. D., & Teskey, W. F. (2010). Self-Calibration of the Trimble (MENSI) GS200 Terrestrial Laser Scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII.
- Fraser, C. S. (1997). Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 149-159.
- Ghilani, C. D., & Wolf, P. R. (2006). *Adjustment Computation: Spatial Data Analysis* (4th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.
- Handayani, H. H., Yuwono, & Taufik, M. (2015). Preliminary Study of Bridge Deformation Monitoring Using GPS and CRP. *Procedia Environmental Sciences*, 24, 266-276.
- Hoffmeister, D., Curdt, C., Tilly, N., & Bendig, J. (2011). 3D Terrestrial Laser Scanning for Field Corp Modelling. *Workshop on Remote Sensing Methods for Change Detection and Process Modelling*.

- Katoch, C. (2013). Close Range Photogrammetric Applications for 3-D Realistic Reconstruction of Object Using Still Images. *Undergraduate Thesis, Netherland: Faculty of Geo-information Science and Earth Observation, University of Twente.*
- Leitch, K. R. (2010). *Close Range Photogrammetric Measurement of Bridge Deformation*. New Mexico: Lambert Academic Publishers.
- Lowe, D. G. (2004). Object Recognition from Local Scale-invariant Features. *International Journal of Computer Vision* 60, (pp. 91-110).
- Mulia, D., & Handayani, H. H. (2014). Studi Fotogrametri Jarak Dekat dalam Pemodelan 3D dan Analisis Volume Objek. *Jurnal Geoid*, 10, 32-39.
- Nugraha, A. (2013). Pemantauan Longsor di Kawasan Ciloto (Cianjur). *Undergraduate Thesis, Bandung: Departement of Geodetic Engineering, Institut Teknologi Bandung.*
- Prameka, A. S. (2013). Kontribusi Pajak Daerah dan Retribusi Daerah Terhadap Pendapatan Asli Daerah (PAD) Kabupaten Malang (Studi pada Dinas Pendapatan Pengelolaan Keuangan dan Aset Kabupaten Malang). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa FEB Vol. 1, Universitas Brawijaya.*
- Putra, R. A. (2014). Pemodelan 3D Menggunakan Teknologi Terrestrial Laser Scanner (Objek Studi: Masjid Al Irsyad Kota Baru Parahyangan). *Undergraduate Thesis, Bandung: Departement of Geodetic Engineering, Institut Teknologi Bandung.*
- Quintero, M. S., Genechten, B. V., Heine, E., & Garcia, J. L. (2008). *Tools for Advanced Three-dimensional Surveying in Risk Awareness Project (3DRiskMapping)*. Leonardo da Vinci Programme of the European Union.
- Reshetyuk, Y. (2009). *Self-Calibration and Direct Georeferencing in Terrestrial Laser Scanning*. Stockholm: VDM Verlag.

- Sayekti, S. I., Amiuza, C. B., & Sujudwijono, N. (2014). Geometri Fraktal pada Candi Singosari sebagai Konsep Desain Museum Purbakala Singosari. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Arsitektur Vol. 2, Universitas Brawijaya*.
- Schluz, T. (2007). Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy. *Dissertation, Berlin: Dipl-Ing, Technical University of Berlin*.
- Snavely, N. (2010). Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections. *Proceedings of the IEEE*, 98(8), 1370-1390.
- Suwardono. (2001). *Candi Singosari*. Malang, Jawa Timur, Indonesia.
- Thompson, M. M. (1980). *Manual of Photogrammetry Fourth Edition*. Rockville: American Society of Photogrammetry.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' Photogrammetry: a Low-cost, Effective Tool for Geoscience Applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Wolf, P. R. (2000). *Elements of Photogrammetry: With Applications in GIS*. McGraw-Hill.



Lampiran I

Spesifikasi Kamera Canon EOS D60



General

Model Name	: Canon EOS 60D
Camera Format	: SLR
Tripod Mount	: Yes
Weight	: 1,234 g (includes batteries, kit lens)
Size	: 145 x 106 x 79 mm
Waterproof	: No.

Image Sensor

Sensor Type	: CMOS
Sensor Manufacturer	: Canon
Effective Megapixels	: 18
Sensor Format	: APS-C
Sensor size	: 22.30mm x 14.90mm
Approximate Pixel Pitch	: 4.30 microns
Focal Length Multiplier	: 1.6x
Aspect Ratio	: 3:02
Color Filter Type	: RGBG
Anti Aliasing Filter	: Fixed
Self-Cleaning	: Yes

Lens & Optics

Lens Mount	: Canon EF/EF-S
Lens	: Canon EF-S 18-135mm f/3.5-5.6 IS
Focal Length	: 29 - 216mm

Focal Length (actual) : 18 - 135mm
 Zoom Ratio : 7.50x
 Aperture Range : f/3.5 - f/22 (wide)
 : f/5.6 - f/38 (tele)

Normal Focus Range : 45 cm to Infinity
 Filter Thread : 67.0mm
 Thread Type : n/a
 Optical Image Stabilization : Yes

Auto Focus

Auto Focus : Yes
 Auto Focus Type : AF-dedicated CMOS Sensor, 9-points, all cross-type AF points, center dual cross-type point for f/2.8
 Auto Focus Assist Light : Yes
 Manual Focus : Yes

Exposure

Maximum ISO (native) : 6400
 Minimum ISO (native) : 100
 ISO Settings : Auto, 100 - 6400 in 1/3 or 1EV steps, H=12800
 Auto ISO Mode : Yes
 White Balance Settings : Auto, Daylight, Shade, Cloudy, Tungsten, White
 : Fluorescent, Flash, Custom, Kelvin 2,500K - 10,000K
 Shutter Speed Range : 30 - 1/8000
 Bulb Mode : Yes
 Exposure Compensation : +/- 5.0EV in 0.3EV steps
 Metering Modes : 63-zone (dual layer) Evaluative, Center-weighted, Partial (6.5%), Spot (2.8%)
 Program Auto Exposure : Yes
 Aperture Priority : Yes
 Shutter Priority : Yes
 Full Manual Exposure : Yes
 Creative Exposure Modes : Creative Auto, Portrait, Landscape, Macro, Sports, Night Portrait, No Flash, Custom User Setting
 Self Timer : 10 or 2 seconds
 High Resolution Composite : No

Lampiran II

Spesifikasi *Terrestrial Laser Scanner GeoMax Zoom 300*



Technical Feature

Max Range	: 300 m
Operating Conditions	: 250 m
Min Range	: 2.5 m
Horizontal field of view	: 360°
Vertical field of view	: 90° (-25° +65°)
Scan Rate	: 40.000 points/sec
Laser beam divergence	: 0.37 mrad
Resolution	: 37 mm x 37 mm @100 m
Accuracy	: 6 mm @50 m, <10 mm @100 m

System Specifications

Scanning optics vertically	: Rotating mirror
Scanning optics horizontally	: Rotating base
Laser Class	: Class 1 (eye safe)
Camera	: 2 calibrated camera
Resolution	: 5 megapixels each camera
Internal memory	: 32 Gb
Data transfer	: Wi-Fi, USB, Ethernet
Software on board	: Dedicated Wi-Fi web interface for Smartphone and Tablet

Physical Specifications

Scanner size	: 215 mm x 170 mm x 430 mm
Scanner weight	: 6.15 kg
Battery size	: 42 mm x 165 mm x 38 mm
Battery weight	: 0.85 kg
Power supply size	: 147 mm x 63 mm x 38 mm
Power supply weight	: 0.2 kg

Electrical Specifications

Power supply	: 12 v (battery or external power unit)
Power consumption	: 40 w (on average)
Battery type	: Li-Poly
Operation	: >3 hours each battery (2 included)

Environmental Specifications

Operation Temperature	: -10° C + 50° C
Storage temperature	: -25° C + 80° C
Humidity	: Non-condensing
Protection class	: IP65

Lampiran III

Surat Ijin Pengambilan Data



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
BALAI PELESTARIAN CAGAR BUDAYA MOJOKERTO
WILAYAH KERJA PROPINSI JAWA TIMUR

Jalan Majapahit No. 141 – 143 Trowulan, Kabupaten Mojokerto 61362

Telepon : (0321) 495515, Faksimil : (0321) 495515

Laman : purbakala.jatim@yahoo.com

SURAT IJIN PEMANFAATAN SITUS CAGAR BUDAYA

Nomor : 1575/CB7/KM/2015

Kepala Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto Wilayah Kerja Propinsi Jawa Timur
memberi ijin kepada :

Nama Mahasiswa : Andi Rachman Putra, NRP. 3511100012

Asal : Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Jurusan Teknik Geomatika

Memfaatkan : Candi Singosari

Keperluan : Ijin Penelitian dengan judul "Pemodelan 3d dengan Menggunakan Metode Structure from Motion dan Terrestrial Laser Scanning (Studi Kasus : Candi Singosari Malang)"

Waktu : 10 September s/d 10 November 2015

Dengan persyaratan sebagai berikut :

1. Dalam kegiatan penelitian tersebut sekiranya dapat menyebabkan kerusakan terhadap situs maupun benda cagar budaya terlebih dahulu dikoordinasikan dengan Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto
2. Ikut menjaga kebersihan dan kelestarian lingkungan situs dan cagar budaya.
3. Kegiatan dilaksanakan pada pagi/siang hari/jam kerja kantor.
4. Selama kegiatan didampingi oleh petugas dari Balai Pelestarian Cagar Budaya Mojokerto.
5. **Wajib menyerahkan 1 Eksemplar hasil penelitian yang telah dilaksanakan.**

Apabila di dalam pelaksanaan kegiatan yang Saudara lakukan ternyata terdapat penyimpangan dari persyaratan di atas, maka akan diberi sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

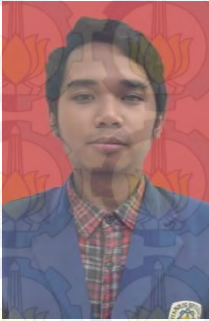
Demikian surat ijin ini diberikan agar dipergunakan sebagaimana mestinya.





“Halaman ini sengaja dikosongkan

PROFIL PENULIS



Penulis dilahirkan di Jakarta, pada tanggal 9 Oktober 1993. Penulis merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Pendidikan dasar sampai menengah ditempuh dan diselesaikan penulis di Jakarta Selatan. Pada tahun 2011, penulis melanjutkan pendidikan Strata 1 di Jurusan Teknik Geomatika ITS dan terdaftar dengan Nomor Registrasi Peserta (NRP) 3511100012. Selama menjalani perkuliahan, penulis aktif di berbagai kegiatan himpunan dan jurusan. Penulis juga beberapa kali mengerjakan proyek bidang terestris milik dosen. Penulis memilih bidang fotogrametri dan *3D modeling* dalam penulisan tugas akhir yang berjudul “Pemodelan 3D dengan Menggunakan Metode *Structure from Motion* dan *Terrestrial Laser Scanning* (Studi Kasus: Candi Singosari, Malang)”.